

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA TVÁŘENÍ MATERIÁLU

Vliv teplotně deformačních podmínek na strukturu a mechanické vlastnosti bezešvých  
trubek

Influence of temperature deformation conditions on the structure and mechanical  
properties of the seamless tube

Student:

Bc. Michael Squerzi

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.

Ostrava 2015

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michael Squerzi**  
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství  
Studijní obor: 2109T034 Technologie tváření a úpravy materiálů  
Téma: **Vliv teplotně deformačních podmínek na strukturu a mechanické vlastnosti bezešvých trubek**  
**Influence of temperature deformation conditions on the structure and mechanical properties of the seamless tube**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretické principy výroby bezešvých trubek
2. Technologické podmínky výroby bezešvých trubek
3. Experimentální část
4. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek po válcování před ohřevem v Krokové peci
5. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek po ohřevu v Krokové peci
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOMORI, K. Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimension rigid - plastic finite - element Metod. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 47, Issue 12, December 2005, Pages 1838 - 1853.
- [2] KOMORI, K., SUZUKI M. Simulation of deformation and temperature in press roll piercing. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 169, Issue 2, 10 December 2005, Pages 249 - 257.
- [3] VUKOTA, B. *Metal shaping processes*, I., Rolling of Metals 2009. 141 s.
- [5] MAMUZIĆ, I., DRUJAN, V. M. *Teorija, materijali, tehnologija čeličnih cijevi*. Hrvatsko metalurško društvo. Zagreb 1996. 510 stranica.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Vojtěch Sikora

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 20.04.2015

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě ..... 30.4. 2015 .....

Michael Squerzi .....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Jiřímu Kliberovi, CSc., za vedení při zpracování této práce a konzultantovi Ing. Vojtěchu Sikorovi, za jeho rady při realizaci této práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům TŽ, a.s. – provozu Válcovna trub, úseku technologie výroby a pracovníkům MMV, s.r.o. za významnou pomoc při zpracování experimentální části Diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří také mým rodičům za trpělivost a obětavost při zpracovávání této práce.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem teplotně deformačních podmínek na výslednou strukturu a mechanické vlastnosti bezešvých trubek na středisku Velkého Mannesmannu provozu Válcovny trub, Třineckých železáren, a.s. Sledovaným parametrem této práce byla především doválcovací teplota, která má významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti a dosaženou strukturu.

Předložená práce je zaměřena na vyhodnocení výsledků zkoušek tahem, nárazové práce a metalografie u oceli S355J2H. V práci jsou zahrnuty výsledky vzorků trubek po odválcování na poutní stoličce a dále po normalizaci v Krokové peci, která je zahrnuta v technologickém toku výroby trub.

Klíčová slova: Doválcovací teplota; Bezešvá trubka; Mechanické zkoušky; Zkoušky nárazové práce; Metalografický rozbor; Velký Mannesmann.

## ABSTRACT

This thesis deals with the effects of thermal deformation conditions on the resulting structure and mechanical properties of seamless tubes to the Mannesmann pipe rolling mill plant, as TŽ. The investigated parameters of this work was primarily finishing rolling temperature, which has a significant effect on the mechanical properties and structure achieved.

The present work is focused on evaluating the results of tensile test, impact energy and metallography of steel S355J2H. The experiment included samples of tubes after rolling on pilgrimage stool and after normalization of the walking beam furnace, which is included in the technological flow tube production.

Keywords: Finishing rolling temperature; Seamless pipe; mechanical tests; examination of the impact of work; The metallurgical analysis; Mannesmann.



## Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Teoretické principy výroby bezešvých trubek .....</b>	<b>6</b>
1.1 <i>Teorie děrovacího pochodu .....</i>	<i>6</i>
1.2 <i>Teorie válcování na poutní stoličce .....</i>	<i>10</i>
1.2.1 <i>Zaválcování předvalku.....</i>	<i>10</i>
1.2.2 <i>Ustálený pochod válcování .....</i>	<i>11</i>
1.2.3 <i>Válce pro poutní válcování .....</i>	<i>13</i>
1.2.4 <i>Poutní trny pro válcování .....</i>	<i>14</i>
<b>2. Technologické podmínky výroby bezešvých trubek.....</b>	<b>16</b>
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>20</b>
3.1 <i>Činitelé ovlivňující strukturu .....</i>	<i>20</i>
3.1.1 <i>Velikost deformace a historie tváření.....</i>	<i>20</i>
3.1.2 <i>Teplota tváření .....</i>	<i>20</i>
3.1.3 <i>Ochlazování po odválcování .....</i>	<i>21</i>
3.2 <i>Vliv prvků na výsledné mechanické a strukturní vlastnosti .....</i>	<i>21</i>
3.3 <i>Uzdravovací procesy .....</i>	<i>23</i>
3.3.1 <i>Dynamické uzdravování .....</i>	<i>23</i>
3.3.2 <i>Dynamické zotavení .....</i>	<i>23</i>
3.3.3 <i>Dynamická rekrytalizace.....</i>	<i>24</i>
3.3.4 <i>Postdynamické uzdravování .....</i>	<i>25</i>
3.3.5 <i>Kinetika statické rekrytalizace.....</i>	<i>25</i>
3.3.6 <i>Růst zrna.....</i>	<i>27</i>
.....	<i>27</i>
3.4. <i>Mechanické zkoušky .....</i>	<i>27</i>
3.4.1 <i>Zkouška tahem.....</i>	<i>27</i>
3.4.2 <i>Zkouška rázem v ohybu .....</i>	<i>31</i>
.....	<i>31</i>
3.5 <i>Cíle práce .....</i>	<i>32</i>
3.6 <i>Zkoumaná ocel S355J2H .....</i>	<i>32</i>

<b>3.7 Popis experimentu .....</b>	<b>33</b>
<b>3.7.1 Válcování trubek tloušťky stěny 10 mm.....</b>	<b>33</b>
<b>3.7.2 Válcování trubek tloušťky stěny 30 mm.....</b>	<b>34</b>
<b>3.7.3 Válcování trubek tloušťky stěny 60 mm.....</b>	<b>36</b>
<b>3.8 Zkoušení mechanických vlastností .....</b>	<b>37</b>
<b>4. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek odebraných po válcování před ohřevem v krokové peci.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 10 mm .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 10 mm .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 30 mm .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 30 mm .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 60 mm .....</b>	<b>47</b>
<b>4.6 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 60 mm .....</b>	<b>50</b>
<b>5. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek odebraných po ohřevu v krokové peci .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 10 mm .....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 10 mm .....</b>	<b>56</b>
<b>5.3 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 30 mm .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 30 mm .....</b>	<b>60</b>
<b>5.5 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 60 mm .....</b>	<b>61</b>
<b>5.6 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 60 mm .....</b>	<b>64</b>
<b>6. Závěr .....</b>	<b>66</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>67</b>

## Úvod

Hutnictví je jedním z nejstarších odvětví v dějinách lidstva. Jeho úspěchy ovlivnily vývoj a civilizaci natolik, že jsou podle něj pojmenovány jednotlivé etapy lidstva. Za zmínku stojí především pojmenování jako "doba bronzová" nebo "doba železná" [1].

Jedním ze speciálních odvětví hutní výroby, které se rozvinulo ve 20. století a zároveň dodnes zaujímá významné místo v hutnictví je výroba trubek. Trubky jako produkt lidské vynalézavosti využívá člověk od nejstarších dob lidské civilizace, avšak trvalo mnoho staletí, než vývoj a způsoby použití trubek dospěly k dnešní technické výši a dokonalosti. Velmi mladým hutním výrobkem, mnohem mladším než jiné druhy válcovaných výrobků, jsou bezešvé ocelové trubky. Optimalizace technologie výroby trubek spolu se zdokonalováním vlastností vyráběných jakostí umožnilo mimo jiné i rozvoj některých důležitých průmyslových odvětví jako je například těžba ropy a její další zpracování, rozvoj chemického průmyslu, rozvod tekutých paliv a plynů a v neposlední řadě také využití bezešvých trub pro vysokotlaké parní kotle [2].

U nás se začaly bezešvé trubky vyrábět velmi brzy potom, co zavedli jejich výrobu bratři Mannesmannové. V roce 1886 založili bratři Mannesmannové výrobu trubek v bývalém Rakousko-Uhersku sesterskou společností, která zahájila výrobu bezešvých trubek v letech 1886 až 1888 v Chomutově. Roku 1889 se v chomutovském závodě začaly válcovat bezešvé trubky na poutní stoličce a odtud byl tento způsob zaveden i v ostatních závodech firmy Mannesmann. Ve výrobě trubek nastal další významný pokrok po druhé světové válce. V té době byly postaveny nové válcovací tratě a zavedena výroba nových druhů trubek, zejména ze slitinových ocelí pro chemický průmysl, stavbu kotlů, ke konstrukčním účelům apod. Kromě Mannesmannova způsobu výroby bezešvých trubek, který je u nás nejrozšířenější, byla na počátku minulého století zavedena ve Vítkovických železárnách výroba bezešvých trubek způsobem Stiefelovým a u bývalé firmy Hahn v Bohumíně výroba bezešvých trubek podle způsobu Erhardtova, válcováním na tzv. švédském duu [3].

Předložená diplomová práce popisuje vliv teplotně deformačních podmínek na výsledné vlastnosti válcovaných trubek Mannesmannovým způsobem z hlediska mechanických a strukturních vlastností. Zkoumány budou trubky válcovány na středisku Velký Mannesmann, teplé části Válcovny trub (dále jen VT), dříve akciové společnosti, v současnosti jednoho z provozů společnosti Třinecké železářny, a.s.

Experimentální část této práce se bude zabývat různými teplotami doválcování na poutní stoličce. Vybrány budou trubky s tenkou, střední a silnou stěnou válcované z jedné tavby a stejného průměru vsázky. Účelem této práce je získat podvědomí o tom, jak se pohybují mechanické a strukturní vlastnosti se změnou doválcovací teploty. Výsledky práce by měly sloužit pracovníkům technologie provozu VT k poznatkům a případné změně nastavených teplot v Karuselové peci zkoumané jakosti S355J2H.

## 1. Teoretické principy výroby bezešvých trubek

Rozvoj parních strojů kladl na trubky stále vyšší nároky. Trubky vyráběné svařováním těmto požadavkům nevyhovovaly, a proto bylo nutné hledat nové způsoby jejich výroby. Proces známý jako Mannesmannův byl založen na principu průtlačného děrování, který je po celá desetiletí používán v kombinaci s poutním válcováním. Mannesmannův způsob výroby trubek, je dnes využíván pro válcování vnějších průměrů 60 až 660 mm s tloušťkou stěny 3 – 125 mm. Výchozím materiálem jsou ve většině případů kruhové ocelové kontislitky, ale vhodnou alternativou mohou být také ingoty[4; 5; 6].

Novou technologii vyřešili na svou dobu geniálním způsobem bratři Reinhard (\*1856, †1922) a Max (\*1857, †1915) Mannesmann. „Proces kosého válcování a příslušná válcovna“ byly také patentovány. O významu tohoto řešení svědčí i fakt, že i po více než 100 letech je tato technologie stále živá a perspektivní. Bratři Mannesmannové se však původně výrobou trubek nezabývali a o tom jak na toto řešení přišli, existují dvě legendy [7].

Podle první verze byl princip řešení spojen s „reelingem“, který byl používán při rovnání trubek oceli, určené k výrobě pilníku. Při tomto způsobu se však objevovaly trubky, u kterých se na vnitřním povrchu tvořily vnitřní vady. Totéž se projevovalo při příčném válcování kulatiny pro čepy a písní tyče. Válcování probíhalo na stoličce – tzv. „reelu“ se třemi válci. Ukázalo se, že při náhradě třetího horního válce vodítkem byl získán efekt „rozvolnění“, což vedlo k vynálezu kosého děrování. Druhá teorie tvrdí, že Reinhard Mannesmann si při jednom obědě hrál s kouskem chleba, který válel mezi prsty. Při tomto pohrávání se dostal s chlebem proti párátku, které držel v druhé ruce a vznikala tak dutý předvalek [7].

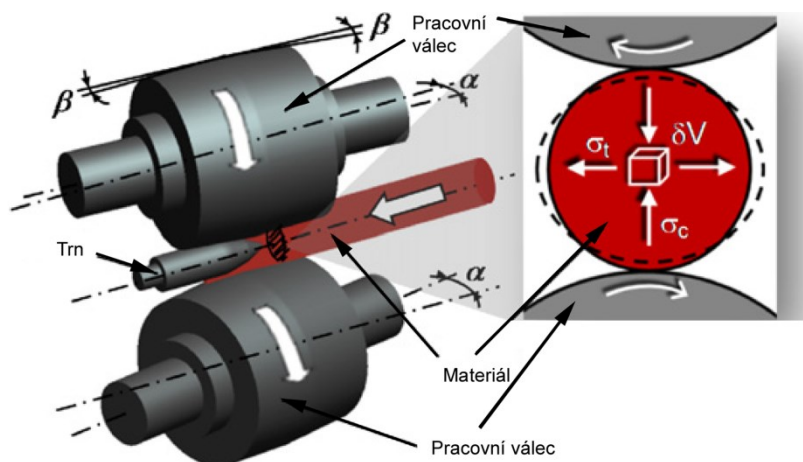
Nejbližší k reálnému hodnocení je názor profesora Franze Reuleauxe (přítel rodiny a bývalý učitel vynálezců), který vyslovil na přednášce v Berlíně, že vynález je výsledkem úporného přemýšlení a nesčetných pokusů při řešení úkolů, jež vynálezci zadal jejich otec [7].

### 1.1 Teorie děrovacího pochodu

Bezešvé trubky jsou vyráběny ve třech stádiích, kde prvním je děrování vsázkového materiálu, kdy výsledkem jsou tlustostěnné předvalky. Druhým stádiem je rozválcování tlustostěnných předvalků na válcovací stoličce. Třetím stupněm je kalibrování tenkostěnných trubek získaných při rozválcování na válcovací stoličce [8].

Děrování lze provést třemi různými způsoby. Jedná se o tlakové válcování s děrováním, druhým způsobem je děrování pomocí kotoučů a dále tzv. "corn type" děrování rotační. U prvních dvou způsobů má tvar průřezu materiálu symetrii pouze bodovou, kdežto u Mannesmanova válcování je symetrie lineární. Při posledně jmenovaném typu děrování

je materiál otáčen kolem své podélné osy několikrát. Tento typ děrování je znázorněn na **obrázku č. 1**[8].



**Obr. 1.** Schéma Mannesmanova procesu děrování

Děrovací proces se popisuje jako iniciace a růst dutiny. Pro modelování a vznik trhliny se využívá těchto základních kritérií [8].

### Kritérium deformace

Toto kritérium předpokládá, že k porušení materiálu dojde v případě, kdy intenzita deformace dosáhne hodnoty  $C_{CR}$  ( $\bar{\varepsilon} = C_{CR}$ ), kde

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

$\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3$  jsou složky hlavních deformací

### Cocroft a Latham kritérium

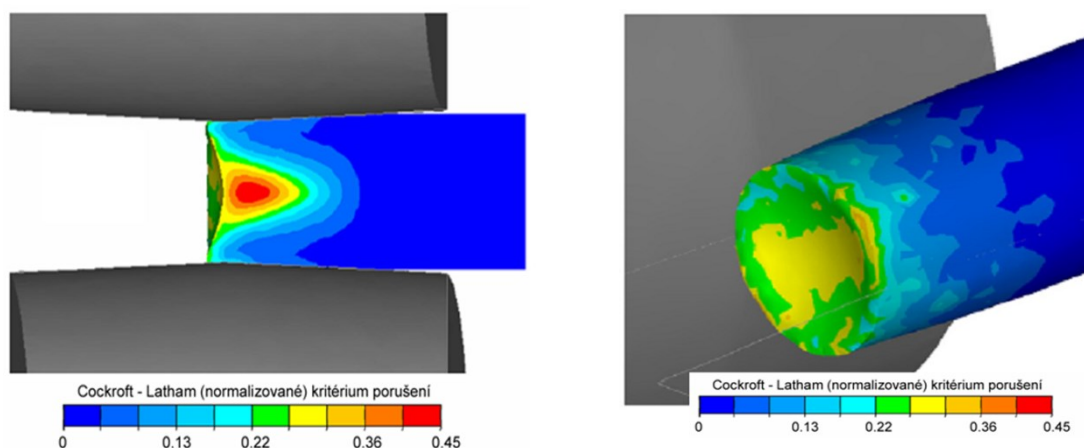
Kritérium popisuje stav, kdy se trhlina objeví v momentě, když vložená plastická deformace ovlivněná hlavním napětím dosáhne kritickou hodnotu  $C_{CR}$ .

$$C_{CR} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_{\max} d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

kde  $\sigma_{\max}$  - maximální hlavní tahové napětí;

$\bar{\varepsilon}_f$  - kritická deformace při vzniku trhliny

$\bar{\varepsilon}$  - ekvivalentní plastická deformace



**Obr. 2.** Kritérium porušení dle Latham - Cockroft modelu

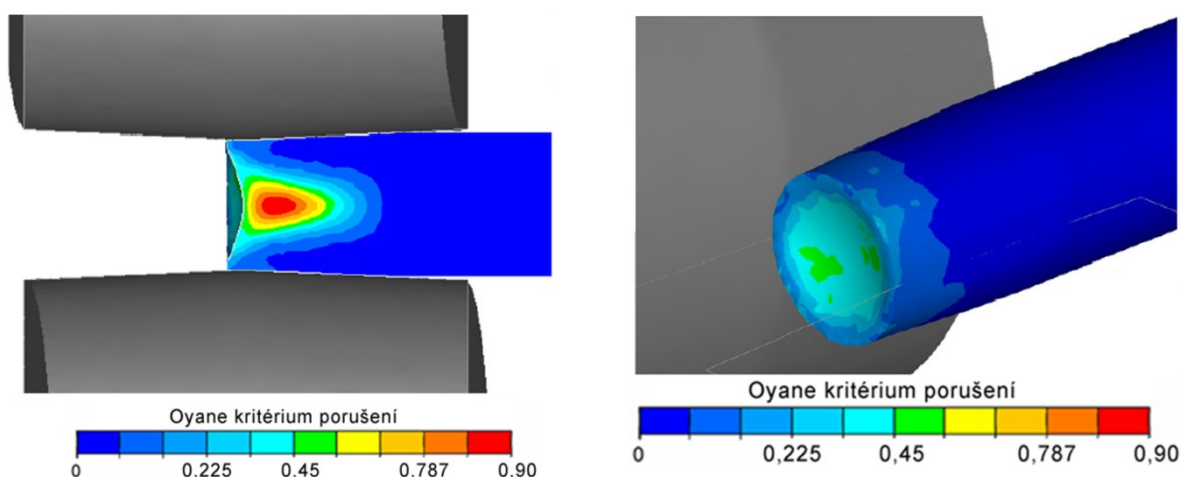
### Brozzovo kritérium

Vychází z předchozího kritéria a je založeno na hydrostatickém a říká, že tvařitelnost materiálu je funkcí hydrostatického středního normálového napětí (tlaku)  $\sigma_H$  a maximálního hlavního napětí  $\sigma_{\max}$ . Jeho formulace je [8]:

$$C_{CR} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_{\max}}{3(\sigma_{\max} - \sigma_H)} d\bar{\varepsilon} \quad , \quad \sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3)$$

### Oyane kritérium

Tento model je založen na vzniku trhliny z důvodu šíření dutiny v materiálu, vzhledem k neuspokojivým výsledkům z předchozích modelů. Vzhledem k Latham Cockroftova modelu je tento model charakterizován daleko nižšími hodnotami porušení.

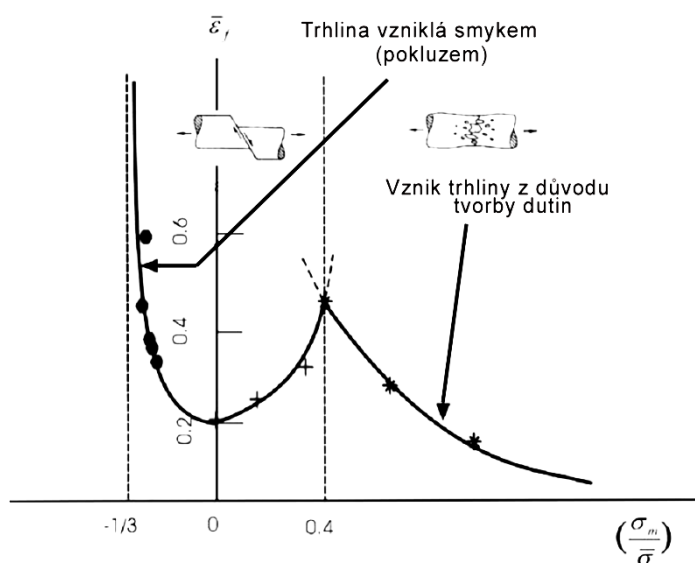


**Obr. 3.** Kritérium porušení podle Oyaneho modelu



Mezi další používaná kritéria můžeme zařadit Ayada kritérium, Lemaitre kritérium, Boltovo kritérium a mnoho dalších [8].

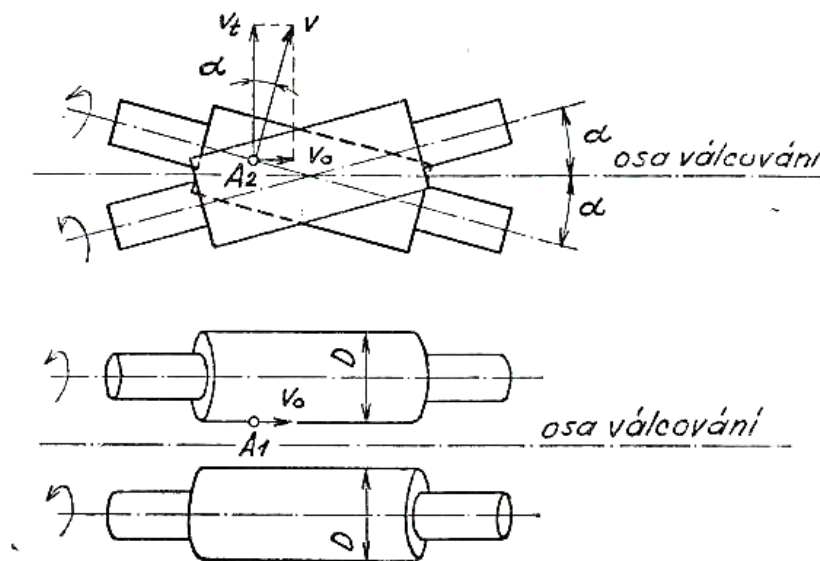
Při modelování děrovacích pochodů vzniká také problém s postavením děrovacího trnu, vzhledem ke vzdálenosti vzniku trhliny uvnitř trubky. Při velké vzdálenosti se vzniklá trhlina šíří bez přičinění trnu a vnitřní povrch trubky může oxidovat. Naopak, pokud je trn příliš blízko, dochází k příliš velkému opotřebení trnu. V závislosti na hodnotě prostorového stavu napjatosti (stress triaxility), může materiál dosáhnout porušení různými způsoby. Závislost intenzity deformace na prostorovém stavu napjatosti je znázorněna na **obrázku č. 4** [8].



**Obr. 4.** Závislost intenzity deformace na prostorovém stavu napjatosti

Děrovací proces je z technologického hlediska značně složitý. V minulosti se jeho teorie rozpracovávala na základě zákona o zachování objemu, který za jednotku času prochází každým průřezem deformačního pásma mezi děrovacími válci. Tato teorie vedla ke zvětšení délky kužele příčného válcování na děrovacím trnu a rovněž zvětšení délky samotného děrovacího trnu [1; 9].

Princip kosého válcování je znázorněn na **obrázku č. 5**.



**Obr. 5.** Princip kosého válcování

## 1.2 Teorie válcování na poutní stolici

Vyděrovaný předvalek přichází k rozválcování na poutní stolici z děrovacího stroje s teplotou 1100 - 1180°C. Z důvodu snížení tření a hladkosti vnitřního povrchu trubky a v neposlední řadě také z důvodu snadnějšího vytažení trnu z trubky se trn maže grafitovou kaší [3].

Pracovní část poutního trnu musí být o 300 - 500 mm delší, než je vyděrovaný předvalek. Přechodování předního konce je důležité pro tzv. zaválcování trubky. Poutní trny jsou mírně kuželovité, přičemž střední průměr trnu je shodný s vnitřním průměrem trubky v teplém stavu. Mírná kuželovitost poutních trnů umožňuje také snadnější vytažení z vyválcované trubky. Na hlavu poutních trnů se nasazují tzv. kroužky, které umožňují doválcování poutní hlavy až do samého konce předvalku [3].

Poutní válcování se skládá ze dvou technologických prvků. Prvním z nich je zaválcování a druhým je přechod do ustáleného stavu válcování. Poutní válce se otáčejí proti sobě a proti směru podávání trnu do záběru. V poloze válců, kdy jsou naproti sobě obráceny prázdné kalibry, tedy část poutních válců, kdy rozměry jsou větší než průměr dutého předvalku, se předvalek posunuje do dalšího záběru. Zároveň se předvalek pootočí vždy kolem své osy přibližně o 90° [3].

### 1.2.1 Zaválcování předvalku

Na začátku válcování se trubka nejdříve „zaválcovává“ 4 až 5 - ti otáčkami válců s minimálním podáním. Účelem je vytvořit začátek vývalku s požadovanou tloušťkou stěny a bez trhlin. Rychlost válců je přitom neměnná, vše je řízeno podávacím zařízením.

Při válcování tenkých stěn bývá počet otáček při zaválcování větší. Vše je dáno rychlejším chladnutím předvalku, a nutností ukončit válcování dříve, než předvalek zchladne [3].

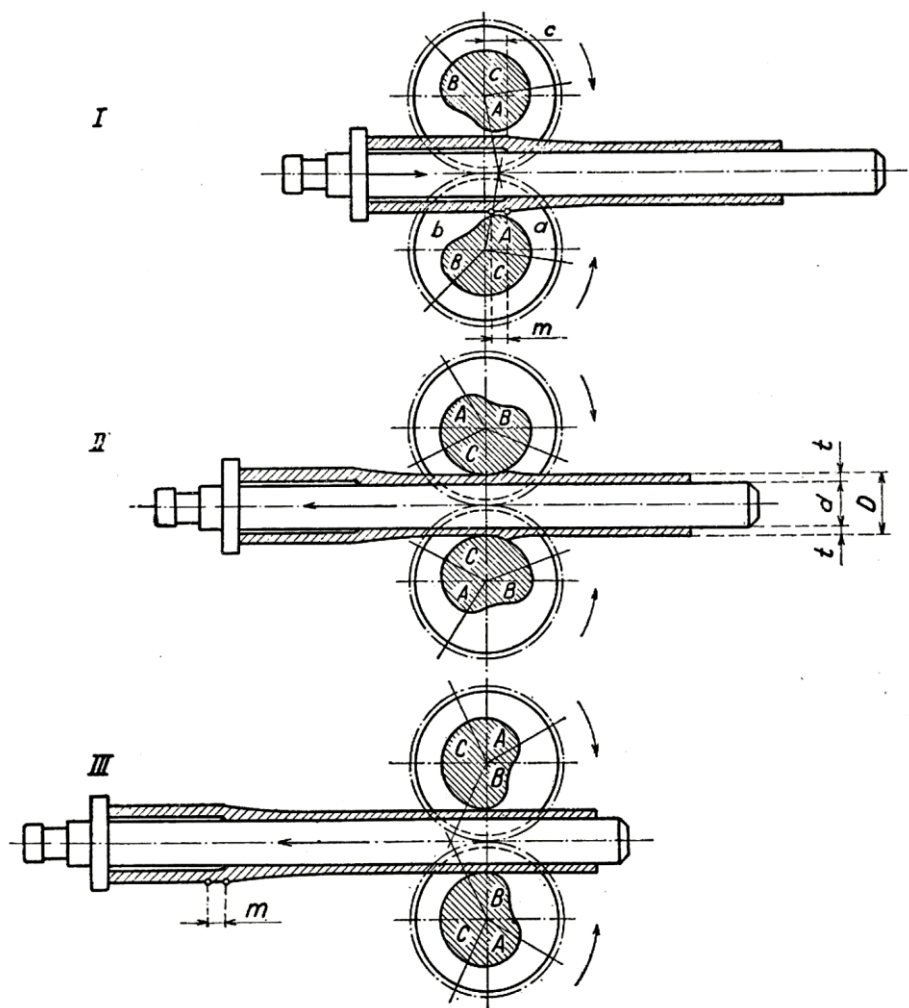
Při zaválcování se postupuje tak, že v momentě, kdy jsou proti sobě prázdné kalibry poutních válců, vsune podávací zařízení poutní trn s předvalkem do svislé roviny, proložené osami horního a spodního válce. Předvalek se přitom opírá o pomocný váleček umístěný mezi podávacím zařízením a poutní stolicí. V momentě uchopení předvalku mezi válce dochází ke sjetí válečku do nepracovní polohy. Účelem tohoto válečku je přesné zasunutí předvalku v osovém směru, což výrazně usnadní zaválcování [3].

Po skončení jedné periody válcování (po jednom otočení válců), kdy se válce natočí proti sobě opět prázdným kalibrem, se předvalek s trnem pootočí o 90° a současně dochází k jeho opětovnému posunu do válců. Tento způsob se opakuje několikrát za sebou, až do vytvoření požadovaného začátku trubky. Poté proces plynule přejde do ustáleného pochodu válcování [3].

### ***1.2.2 Ustálený pochod válcování***

Ustálený pochod válcování plynule navazuje na zdárně ukončený proces zaválcování trubky. Z tohoto hlediska se ustálený pochod válcování od zaválcování zásadně neliší, válcuje se však jistou konstantní hodnotou posunu do záběru válců. Velikost posunu poutní stolice se volí co největší, se zřetelem na válcovanou jakost, délce hladící části kalibru válců, průměr a tloušťku stěny válcované trubky [3].

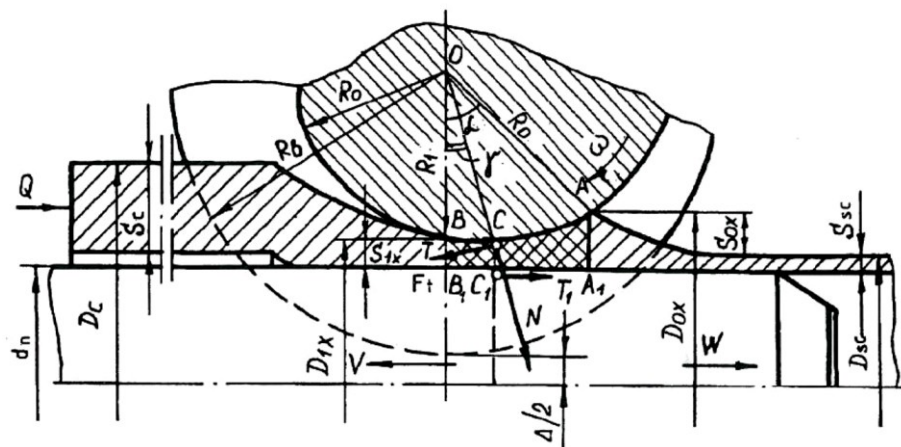
U malých tratí bývá velikost posunu 8 – 20 mm, u středních a velkých tratí 15 – 35 mm. Příliš velký posuv způsobí, že délka pracovní části kalibru nestačí dávku materiálu vyválcovat a na vývalku se projeví vyvýšená místa, čímž se vytvoří nestejněměrná trubka s nadměrnou tloušťkou stěny. Ustálený pochod válcování je znázorněn na **obrázku č. 6** [3].



**Obr. 6.** Ustálený pochod válcování na poutní stolici

Nákres I. znázorňuje vsunutí předvalku do válců. Nákres II. představuje okamžik, kdy válce zatlačily provalek dozadu a v záběru je ještě hladicí část kalibru, označená písmenem C. Předvalek s trnem se při dalším pootočení válců pohybuje stále dozadu až do polohy označené na nákresu č. III, kde se předvalek střetne s výběhovou částí pracovního kalibru a tím končí vlastní válcování v jedné otáčce. Předvalek je dále připraven k dalšímu posunu do záběru, to je do polohy I [3].

Po ukončení válcování dochází k zajištění celého podávacího zařízení dozadu. Trubka se opírá o zarážku umístěnou v poutním stojanu a trn, který je uzamčen v zámku na podávacím zařízení vyjíždí ven z trubky. Pracovní válce se od sebe oddálí a trubka tak může pokračovat výběžnými válečky k dalšímu zpracování. Na poutní stolici navazuje pila za tepla, na níž dochází k odřezu konců trubek – tzv. patní i hlavové části. Schéma poutního válcování je detailněji znázorněno na **obrázku č. 7** [3].



**Obr. 7.** Schéma podélného poutního válcování [1]

Válcování se uskutečňuje pomocí třecí síly  $F_t$ , v zóně deformace. Stejně jako u jiných typů podélného válcování, se zóna deformace označuje úhlem  $\alpha$ , úhel neutrální osy  $\gamma_x$ , poloměr neutrální osy válcování  $R_1$ , který se zvětšuje na poloměr  $R_0$ . Pracovní válec se otáčí konstantní úhlovou rychlostí  $\omega$ , a po otočení o určitý úhel se změny parametry válcovaného materiálu ( $D_{ex}$ ,  $s_{ex}$ ,  $D_{sc(x)}$ ,  $s_{sc(x)}$ ). Válcování se uskutečňuje na poutním trnu  $d_n$  [1].

Poutní trny se při válcování značně namáhají jak mechanicky, tak tepelně. Pro maximální prodloužení jejich životnosti se v praxi pro válcování konkrétní stěny využívá sada několika trnů. Poutní trn, který byl vytažen z vyválcované trubky, je ochlazován – nejčastěji v chladicí vaně. Válcování následujícího kusu trubky stejné stěny je poté prováděno na dalším trnu v sadě. Tímto způsobem dochází k bezpečnému ochlazení poutních trnů a eliminaci jejich praskání či jiného poškození. Trny malých průměrů do 52 mm se chladí na vzduchu a do vany s vodou se vkládají, jakmile jejich teplota klesne pod 200°C [3].

Teplota doválcování za poutní stolicí je různá podle tloušťky stěny a délky trubek. Při válcování krátkých kusů s větší tloušťkou stěny je teplota doválcování nad  $A_{c3}$ , takže mechanické vlastnosti trubky se shodují s vlastnostmi normalizačně žíhaného materiálu. U tenkostěnných trubek s větší délkou teplota doválcování může klesnout pod  $A_{c3}$  [3].

### 1.2.3 Válce pro poutní válcování

Rozměry válců pro poutní válcování se stanovují empiricky. Základ je dán ideální průměrem válců  $D_i$ , který odpovídá vzdálenosti os obou válců. Tento ideální průměr se stanovuje podle maximálního průměru trubky  $D_{max}$ . Stanovení ideálních průměrů válců pro různé typy válcovacích stolic je následující [3]:

a) pro malé válcovací tratě

$$D_i = 2 \cdot D_{max} + 150 \text{ mm} \quad (4)$$

b) pro střední tratě

$$D_i = 1,25 \cdot D_{max} + (450 \text{ až } 550) \text{ mm} \quad (5)$$

c) pro velké tratě

$$D_i = 1,35 \cdot D_{max} + (550 \text{ až } 650) \text{ mm} \quad (6)$$

Skutečný průměr válců je  $D_v$  je menší než ideální průměr  $D_i$ , a to o velikost mezery mezi válci, která bývá 20 až 30 mm.

Délka těla válce se vypočítá z následující rovnice:

$$L_0 = \frac{D_{p \max} + a}{\cos \beta} + (30 \text{ až } 40) \text{ mm} \quad (7)$$

kde  $\beta$  - úhel rozevření kalibru;

$D_{p \max}$  - největší průměr předvalku;

$a$  - mezera.

Průběh záběrové křivky ve vrcholu kalibru byla odvozena rovnice dle P. T. JEMELJANĚNKA:

$$r_x = (r_0 + t_p) - t_p \cdot \exp \left[ (1 + k) \cdot C \cdot \alpha - \frac{k \cdot C}{\alpha_1} \cdot \alpha_2 \right] \quad (8)$$

kde  $r_x$  - proměnlivý poloměr záběrové křivky z osy válce;

$r_0$  - poloměr počátku záběrové křivky;

$t_p$  - tloušťka stěny dutého předvalku;

$\alpha$  - proměnlivý středový úhel v obloukové míře záběrové křivky;

$C$  - konstanta;

$k$  - koeficient průběhu tváření.

#### 1.2.4 Poutní trny pro válcování

Tvar trnů je válcovitý nebo kuželovitý. Hlavním rozměrem trnu pro válcování je jeho střední průměr  $\delta_s$ . Tento střední průměr trnu musí být totožný s vnitřním průměrem



trubky v teplém stavu. Při výpočtu středního průměru trnu musíme počítat s tepelným roztažením trnu a trubky [3].

$$\delta_s = d_t \frac{1+\alpha \cdot T_t}{1+\alpha \cdot T_d} \quad (9)$$

kde  $\delta_s$  – střední průměr trnu;

$T_t$  – teplota trubky;

$T_d$  – teplota trnu;

$\alpha$  – lineární koeficient tepelné roztažnosti.

Je-li průměrná teplota trubky 1000°C a průměrná teplota trnu 500°C, je při různě zvolených lineárních koeficientech tepelné roztažnosti [3].

$$\delta_s = (1,006 \text{ až } 1,007) \cdot d_t \quad (10)$$

Délku trnu  $l_z$ , potřebnou k zaválcování předvalku lze vypočítat z následující rovnice, je však závislá na rozměrech poutních válců [3].

$$l_z = 1,2 \left( \frac{r_0 + r_p}{2} + \alpha_1 + r_p \cdot \alpha_2 \right) \quad (11)$$

kde  $r_0$  – počáteční poloměr záběrové části kalibru;

$r_p$  – poloměr hladicí části kalibru;

$\alpha_1$  – středový úhel záběrové části;

$\alpha_2$  – středový úhel hladicí části.

## 2. Technologické podmínky výroby bezešvých trubek

Středisko Velký Mannesmann (dále jen VM) vyrábí tvářením za tepla bezešvé trubky poutním válcováním s vnějším průměrem od 168,3 mm do 406,4 mm a tloušťkou stěny 6,3 mm až 63,5 mm v závislosti na vnějším průměru. Jsou zde válcovány trubky třídy oceli 11 – 17 (oceli uhlíkaté, ušlechtilé, nízko a středně legované). Vsázkový materiál je dodáván z Třineckých železáren, a.s. a je dělen dle požadovaných rozměrů trubky pálením nebo řezáním na potřebnou délku od 650 mm do 2500 mm. Podrobnější přehled vsázkového materiálu je tento:

- Kruhové kontislitky 320 mm, 410 mm, 470 mm a 525 mm;
- Sochory převálcované z kruhových kontislitek do Ø 300 mm;
- Ingoty různých rozměrů jako kontislitky, sochory nebo ingoty;
- Výkovky podobných rozměrů jako kontislitky, sochory nebo ingoty.

Ohřev vsázkového materiálu probíhá v Karuselové peci, kde je vsázka ohřívána dle příslušné skupiny ohřevu na tvářecí teplotu. Teplota ohřevu je dána technologickým předpisem a pohybuje se v rozmezí 1180 °C až 1300 °C, po dobu 225 až 480 minut. Fotografie Karuselové pece je znázorněna na **obrázku č. 8**. Způsob sázení vsázkového materiálu do pece je v 1, ve 2 nebo ve 3 řadách v závislosti na rozměrech kruhového sochoru nebo ingotu [10].



**Obr. 8.** Karuselová pec VM[11]

Po ohřevu v Karuselové peci je vsázkový materiál, z důvodu optimálního vyděrování nastředěn důlčikovacím zařízením, do hloubky cca 30 mm. Vsázka je následně vyděrována na děrovacím stroji – viz **obrázek č. 9**. Děrovací stroj je dvouválcový s horním opěrným válečkem. Osy pracovních válců jsou od osy děrování nakloněny o 3°. Rozměry

pracovních válců se pohybují od 640 do 695 mm. Horní opěrný váleček se používá v rozsahu 380 až 440 mm. Pro děrování se používají různé tvary děrovacích trnů s průměrem 115 až 370 mm. Vyděrované předvalky jsou dále předány na poutní stolic, kde dochází k výrobě samotných trubek – viz **obrázek č. 10**. Průměr poutních válců se pohybuje v rozmezí 550 až 830 mm s šířkou těla válce 430 až 580 mm. Při výrobě jsou využívány poutní trny délky 3600 mm a 4200 mm [10].



**Obr. 9.** Děrovací stroj tratě VM [11]



**Obr. 10.** Poutní stolice tratě VM [11]



Na poutní stoličce dále navazuje kotoučová pila za tepla, pomocí které dochází k odřezu konců poutních trubek (tzv. hlava a pata). Trubky poté vstupují na chladník č. 1, kde se volně na vzduchu ochlazují na teplotu pod 500 °C. Dle tloušťky stěny a druhu materiálu jsou následně trubky ohřívány v Krokové peci na teplotu 890 až 980°C. Fotografie Krokové pece je znázorněna na **obrázku č. 11** [10].



**Obr. 11.** Kroková pec [11]

Při výše uvedených teplotách jsou trubky kalibrovány v třístojanové stoličce, viz **obrázek č. 12**. Pomocí vysokotlakého ostříku před samotnou kalibrací jsou trubky zbaveny sekundárních okujů. V kalibrovací stoličce se nachází poslední tvářecí operace, kde trubky získávají konečný vnější průměr. Poté jsou trubky předány na chladník č. 2, na němž jsou podle jakosti sprchovány vodní clonou [10].



**Obr. 12.** Kalibrovací stoličce [11]

Tento způsob zpracování trubek je nazýván normalizačním válcováním. V Krokové peci jsou trubky ohřívány na normalizační teplotu 890 - 980°C s celkovou dobou pobytu v peci 30 - 100 minut, v závislosti na tloušťce stěny a materiálu. Po ochlazení na chladícím roštu pod teplotu 450 °C – viz **obrázek č. 13**, se sedmi sprchami rozdělenými do 3 sekcí, jsou trubky vyrovnány na šikmoválcové rovnací stolici a přecházejí na studenou část válcovny, kde jsou trubkám odebrány požadované vzorky na mechanické zkoušky, probíhá nedestruktivní zkoušení a řezání trubek na délky požadované zákazníkem [10; 12].



**Obr. 13.** Chladicí rošt se sedmi řadami sprch [11]

### 3. Experimentální část

#### 3.1 Činitelé ovlivňující strukturu

Vhodnou kombinací činitelů ovlivňující výslednou strukturu je možné cíleně ovlivnit výsledné vlastnosti tvářeného výrobku. Docílíme tím tak specifickou, předem nadefinovanou mikrostrukturu výrobku, se kterou úzce souvisí mechanické a fyzikální vlastnosti daného materiálu. Mezi činitele, které významným způsobem ovlivňují strukturu, patří:

- velikost deformace a historie tváření;
- teplota tváření;
- ochlazování po doválcování.

##### 3.1.1 Velikost deformace a historie tváření

V praxi se můžeme často setkat s dějem, kdy výsledný tvar polotovaru není dosažen spojitou deformací, ale opakováním více menších úběrů, mezi nimiž dochází k uzdravování zpevněného materiálu. Při tomto tváření je zabráněno rozšiřování mikrotrhlin, protože v daných prodlevách může docházet ke zjemnění zrna následkem rekrytalizace [13].

Obecně lze říci, že se stoupající velikostí deformace dochází ke zjemňování zrna.

##### 3.1.2 Teplota tváření

Pohyblivost atomů i dislokací roste se stoupající teplotou, zároveň se zrychluje difúze a uzdravování. Se stoupající teplotou však roste také velikost zrna. Tváření za tepla probíhá vždy v určitém intervalu teplot, který můžeme charakterizovat následovně:

- *TT* – tvářecí teplota – obecná teplota, při níž se polotovar tváří;
- *HTT* – horní tvářecí teplota – nejvyšší teplota, na níž lze polotovar ohřát;
- *PTT* – počáteční teplota tváření polotovaru;
- *DTT* – dolní tvářecí teplota – nejnižší možná teplota tváření;
- *DT* – dotvářecí teplota – skutečná teplota polotovaru na konci tváření.

Interval tvářecích teplot se pohybuje mezi teplotami solidu a teplotou nulové rekrytalizace tvářeného kovu. Předějit nežádoucím jevům při ohřevu se dá správným nastavením a dodržením tvářecích teplot. K nepravidelnému ději lze zařadit přehřátí materiálu, kdy dojde k vysokému stupni zhrubnutí zrna. Nejhorším případem je však spálení ohříváného materiálu, kdy dojde k natavení hranic zrn a další tváření takového materiálu je již nemožné [13].



### 3.1.3 Ochlazování po odválcování

Zvolený způsob ochlazování válcovaného materiálu značně ovlivňuje výslednou mikrostrukturu vývalků. Vhodně vybranou rychlostí ochlazování lze měnit obsahy jednotlivých fází a tím zároveň ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti výrobku. Zrychleným ochlazováním, které navazuje na řízené válcování, je možné ovlivnit pevnost, tvrdost a zároveň docílit poměrně dobré houževnatosti, aniž by materiál obsahoval vyšší množství legujících prvků. Mezi hlavní parametry řízeného ochlazování řadíme rychlost ochlazování a rozsah teplot, ve kterém byl materiál danou rychlostí ochlazován. Optimálním nastavením řízeného ochlazování vývalků je možno vyrábět za tepla válcované výrobky bez použití následného tepelného zpracování[14; 15].

## 3.2 Vliv prvků na výsledné mechanické a strukturní vlastnosti

Výsledné mechanické a strukturní vlastnosti materiálu jsou ovlivňovány chemickým složením oceli, jelikož každý prvek v daném množství ovlivňuje výrobek jiným způsobem [16; 17].

### ***Mangan (Mn)***

Je austenitotvorný prvek, který pomáhá odstraňovat křehkost za tepla (snižuje nebezpečí lomu za červeného žáru). Sulfidy MnS jsou za teplot pod 1000°C tvárnější než základní struktura, a proto podporují anizotropii mechanických vlastností. Mangan jakožto prvek zvyšuje prokalitelnost, obrobitelnost, meze kluzu a pevnost výrobku. Kladně ovlivňuje tvařitelnost a svařitelnost, ale naopak snižuje tepelnou a elektrickou vodivost a také zvyšuje koeficient tepelné roztažnosti. Vyšší obsah manganu podporuje šíření oceli. Pokud je v oceli obsah manganu vyšší než 18%, stává se materiál nemagnetický [16].

### ***Uhlík (C)***

Je prvek, který ovlivňuje tvářecí teploty, strukturu a mechanické vlastnosti. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se snižuje interval tvářecích teplot a snižuje se přirozený deformační odpor. Oceli s obsahem uhlíku nad 0,3 % jsou vhodné pro kalení [16].

### ***Křemík (Si)***

Je silně feritotvorný prvek, který zvyšuje mez kluzu a pevnost, žáruvzdornost, odolnost proti opotřebení a mez únavy. Zvyšuje také prokalitelnost a odolnost proti popouštění. Využívá se zejména u pružinových ocelí pro svou schopnost zvyšovat mez pružnosti. Na druhou stranu snižuje elektrickou vodivost a při obsahu nad 1% snižuje svařitelnost[16].

### ***Fosfor (P)***

Řadíme jej do skupiny feritotvorných. Zvyšuje pevnost a tvrdost, ovšem jeho vliv je závislý na obsah uhlíku v oceli. Při obsahu uhlíku do 0,01% je vliv fosforu kladný, kdy

zvyšuje tažnost. Při obsahu uhlíku nad 0,05% zvyšuje fosfor křehkost feritu. Negativní vlastností je dále zhoršená svařitelnost [16].

### ***Síra (S)***

Je nežádoucí prvek v oceli a její obsah by se měl pohybovat v rozmezí 0,001 – 0,01 hm. %. Snižuje korozivzdornost, svařitelnost a houževnatost. Má kladný vliv na zvýšení obrobiteľnosti, a proto se do některých ocelí přidává úmyslně. Tyto oceli mají obsah síry do 0,4 hm. % [16].

### ***Molybden (Mo)***

Řadíme jej do skupiny karbidotvorných a feritotvorných prvků. Snižuje tvařitelnost, ale kladně působí na zvýšení pevnostních vlastností, svařitelnosti, korozivzdornosti, prokalitelnosti a odolnosti proti opotřebení. Používá se u ocelí žárupevných a žáruvzdorných [16].

### ***Měď (Cu)***

Je austenitotvorná, způsobuje zvýšenou odolnost proti povětrnostním vlivům a snižuje schopnost tepelného zpracování [16].

### ***Chrom (Cr)***

Je feritotvorný a karbidotvorný prvek, jehož karbidy zvyšují odolnost proti opotřebení. Chrom jako prvek zvyšuje prokalitelnost, pevnost v tahu za vysokých teplot a odolnost vůči korozi. Naopak snižuje svařitelnost, tepelnou a elektrickou vodivost a dále také snižuje roztažnost. U korozivzdorných ocelí se obsah chromu pohybuje okolo 13% [16].

### ***Nikl (Ni)***

Řadíme jej do skupiny austenitotvorných a nekarbidotvorných prvků, který zvyšuje odolnost proti korozi, vrubovou houževnatost a prokalitelnost. Naopak zlepšuje pevnostní vlastnosti oceli a snižuje svařitelnost [16].

### ***Hliník (Al)***

Je to feritotvorný prvek, který v malých dávkách napomáhá ke zjemnění zrna. Zvyšuje odolnost proti stárnutí, snižuje tvařitelnost [16].

### ***Příklady ostatních mikrolegujících prvků***

Jako mikrolegující se používají prvky jako například vanad, titan, niob. Tyto prvky zlepšují mechanické vlastnosti pomocí precipitačního zpevnění, které brzdí kinetiku uzdravovacích pochodů.

Nejlepší účinek z výše uvedených mikrolegujících prvků má niob, který významným způsobem zvyšuje prokalitelnost.

U ocelí legovaných vanadem je potřebná úroveň houževnatosti dosažena i za vyšších teplot dovalcování, což je příznivé také z hlediska dosahování nižších válcovacích sil. Nepříznivý vliv vanadu je ten, že podporuje křehkost za tepla. Nejběžnější množství vanadu jakožto mikrolegovaného prvku je 0,05 - 0,2 %.

### 3.3 Uzdravovací procesy

Plastickou deformací dochází obecně ke zpevňování tvářeného materiálu, který má snahu dostat na počáteční úroveň nahromaděnou vnitřní energii. Tepelným zpracováním se odstraňuje zpevnění u materiálů tvářených za studena, kdežto u materiálů tvářených za tepla dochází k odpevňování pomocí dynamického a postdynamického uzdravování. Dynamické uzdravování probíhá během deformace, postdynamické uzdravování se děje po ukončení deformace. Toto rozdělení je z hlediska časového, ale uzdravovací procesy se dají také rozdělit podle typu mikrostrukturálních změn. Tento typ uzdravování pak dělíme na zotavení a rekrytalizaci [18].

Při zotavení klesá hustota dislokací jejich anihilací, a tím dochází k přeskupení dislokací a vznik subzrn, neboli polygonizace. Nevznikají nová zrna, ale dochází k poklesu vnitřní energie. Zatímco při rekrytalizaci, díky nukleaci zárodků vznikají nová zrna stejné fáze. Po rekrytalizaci jsou nová zrna menší než původní rovnoosá. Rekrytalizace může nastat jen při dosažení teploty rekrytalizace, které je stanovená na 40 % teploty tání daného kovu [18].

#### 3.3.1 Dynamické uzdravování

Při ideální plastické deformaci za tepla nedochází v průběhu deformace k dalšímu zpevňování, nastává rovnováha mezi zpevňovacími a změkčovacími procesy. Po pružné deformaci dochází nejdříve ke zpevňování a po dosažení maximálního napětí převládá změkčování. Při něm deformačním napětí klesá na minimum, které má již konstantní hodnotu, nezávislou na deformaci. Při tváření za tepla mohou probíhat z pohledu dynamického uzdravování dva základní děje [18]:

- dynamické zotavení;
- dynamická rekrytalizace.

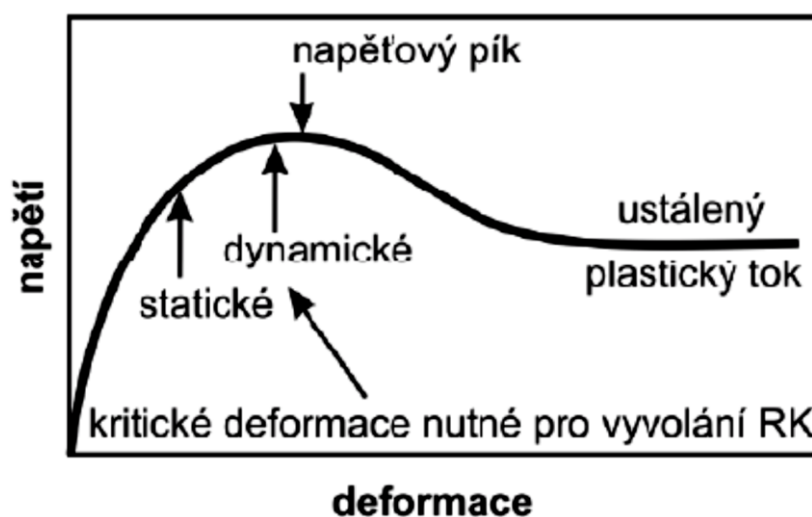
#### 3.3.2 Dynamické zotavení

Uplatňuje se při malých velikostech deformace nebo při nízkých tvářecích teplotách. V průběhu zotavení dochází ke vzniku subzrn a k přemísťování dislokací. Při dynamickém zotavení nevznikají nová zrna, ale vznikají rovnoosá subzrna v protažených zrnech. Nedojde ani k úplnému uzdravení, jelikož se hustota dislokací sníží pouze částečně. Rychlost dynamického zotavení podporuje [18]:

- vyšší obsah vakancí;
- vyšší teplota tváření;
- vysoká energie vrstevných chyb;
- vyšší deformační napětí.

### 3.3.3 Dynamická rekrytalizace

Vytváří nová zrna stejné fáze, odstraňuje zpevnění a zlepšuje plastické vlastnosti. Předpokladem pro vznik rekrytalizace je dosažení určité kritické deformace. Velikost kritické deformace je u dynamické rekrytalizace mnohem větší než u rekrytalizace statické. Z toho vyplývá, že je jednodušší vyvolat rekrytalizaci statickou. Tvar spojitě křivky závislosti napětí na rostoucí deformaci je znázorněn na **obrázku č. 14** a závisí na termomechanických podmínkách tváření [16; 17].



Obr. 14. Závislost napětí na deformaci

Tyto podmínky nám popisuje Zener - Hollomonův parametr, který značíme  $Z$ , a znamená teplotně kompenzovanou deformační rychlost. Výpočet tohoto parametru je znázorněn v **rovnici č. 12**.

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (12)$$

kde  $\dot{\epsilon}$  - deformační rychlost [ $s^{-1}$ ];

$Q$  - aktivační energie [kJ/mol];

$R$  - univerzální plynová konstanta = 8,314 [kJ/mol·K];

$T$  - teplota [K].

Vyšší hodnota parametru  $Z$  posouvá napěťový pík směrem k vyšším hodnotám deformace a napětí, čímž dochází k oddálení dynamické rekrytalizace a roste deformační odpor.

### 3.3.4 Postdynamické uzdravování

Plastická deformace za vysokých teplot je přerušovaný proces, takže během prodlev, nebo po ukončení celkové deformace mohou probíhat postdynamické uzdravovací pochody. Rozeznáváme následující tři děje:

- statické zotavení;
- statická rekrytalizace;
- metadynamická rekrytalizace.

Statické zotavení je hlavním uzdravovacím mechanismem pouze po nízkých hodnotách deformace. Pak platí, že hodnota deformace  $\mathcal{E}$  je menší než hodnota kritické deformace  $\mathcal{E}_{krRs}$ , nutné pro vyvolání statické rekrytalizace. Při tomto uzdravovacím procesu dochází pouze k částečnému uzdravení zpevněné struktury. Při překročení kritické deformace  $\mathcal{E}_{krRs}$ , ale zároveň nedosažení hodnoty nutné k vyvolání dynamické rekrytalizace  $\mathcal{E}_{krRd}$ , dochází k úplnému uzdravení deformované struktury [16; 17; 18].

Rychlost postdynamického uzdravování při izotermickém žíhání vyjadřuje Avramiho rovnice č. 13:

$$X_R = 1 - \exp(-K \cdot t^n) \quad (13)$$

kde  $X_R$  - rekrytalizovaný podíl;

$t$  - doba žíhání [s];

$n$  - kinetický exponent;

$K$  - konstanta vyjadřující vliv termomechanických podmínek tváření a žíhání.

### 3.3.5 Kinetika statické rekrytalizace

Kinetika rekrytalizace závisí na hustotě nukleačních míst, hnací síle pro růst a na mobilitě hranic zrn. Teorie však nedokáže přesněji definovat vliv ostatních parametrů, a proto se využívá fyzikální rovnice v podobě konstitutivní. Například pro ocel mikrolegovanou niobem má tato rovnice tvar následující [19]:

$$t_{0,005x} = 6,75 \cdot 10^{-20} d_0^2 \cdot \varepsilon^{-4} \exp\left(\frac{300000}{R.T}\right) \exp\left[\left(\frac{2,75 \cdot 10^5}{T}\right) - 185[Nb]\right] \quad (14)$$

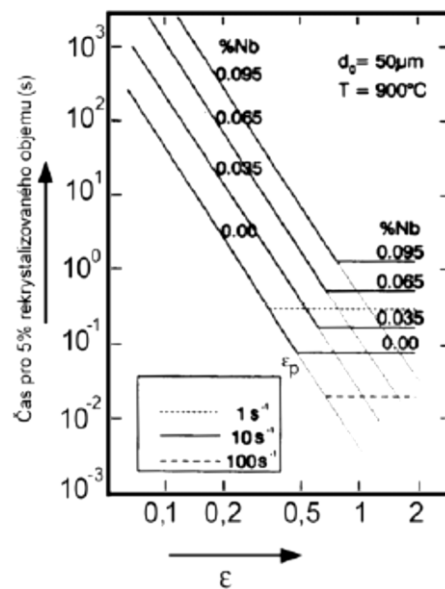
Tato rovnice platí pouze za předpokladu, že deformace  $\varepsilon$  je menší než pro počátek dynamické rekystalizace. Následující velikost rekrytalizovaného zrna  $d_{rex}$  je popsána vztahem[19]:

$$d_{rex} = 0,9 \cdot d_0^{0,67} \cdot \varepsilon^{-0,67} \quad (15)$$

Mezi rovnicí (14) a (15) existuje vztah, kdy nedochází k hrubnutí zrna během rekystalizace. Počet zárodků pak lze vypočítat ze vztahu [19]:

$$N_v = 0,43 \cdot d_{rex}^{-3} \quad (16)$$

Z této rovnice je patrné, že v rovnici (14) je vliv původní velikosti zrna na kinetiku rekystalizace závislý na průběhu nukleace. Závislost ve tvaru  $d_0^2$  vzniká pouze tehdy, probíhá-li nukleace pouze na hranicích zrn.



**Obr. 15.** Závislost času na počátku statické rekystalizace při teplotě 900°C na deformaci, až do  $\varepsilon_p$  pro niobem mikrolegovanou ocel a velikosti zrna 50  $\mu\text{m}$

Kinetiku rekystalizace oceli C – Mn za tepla lze popsat **rovnicemi č. 17 a 18.**

$$t_{0,5}^{SRX} = 2,05 \cdot 10^{-10} \cdot Z^{-0,375} \cdot d_0^2 \cdot \varepsilon^{-1,7} \cdot \exp\left(\frac{385000}{R.T}\right) \quad (17)$$

$$t_{0,5}^{SRX} = 4,35 \cdot 10^{-13} \cdot d_0 \cdot \varepsilon^{0,68} \cdot \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left(\frac{248000}{R.T}\right) \quad (18)$$

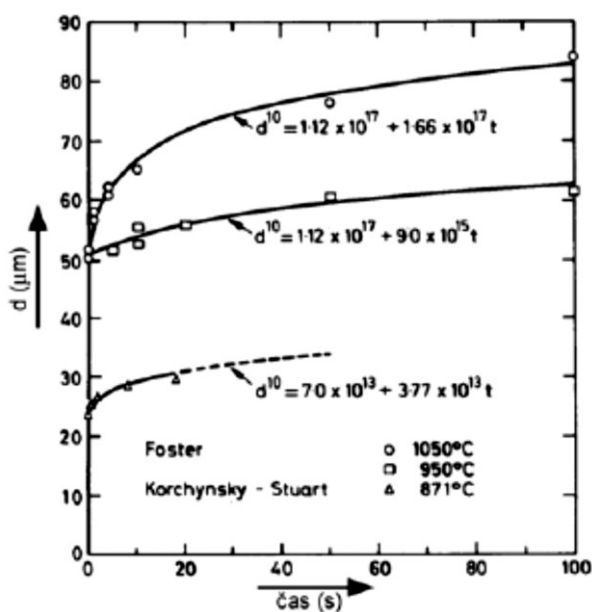


### 3.3.6 Růst zrna

Po ukončené rekrytalizaci nastupuje v krátkém časovém období růst zrna v mezipauzách mezi jednotlivými průchody. Toto tvrzení je znázorněno na **obrázku č. 16** pro ocel C – Mn. Časová závislost rekrytalizovaného zrna je teoreticky uvedeno v **rovnici č. 19**[19].

$$d^n = d_{rex}^n + A t \exp\left(\frac{-Q_{gg}}{R.T}\right) \quad (19)$$

Hodnota exponentu  $n$  je vyšší, než předpokládaná hodnota 2. Na obrázku č. 16 nejlépe popisuje experimentální údaje pro časy do 100 s dokonce exponent  $n = 17$ [19].



**Obr. 16.** Růst zrna jako funkce času po úplné statické rekrytalizaci u oceli C - Mn

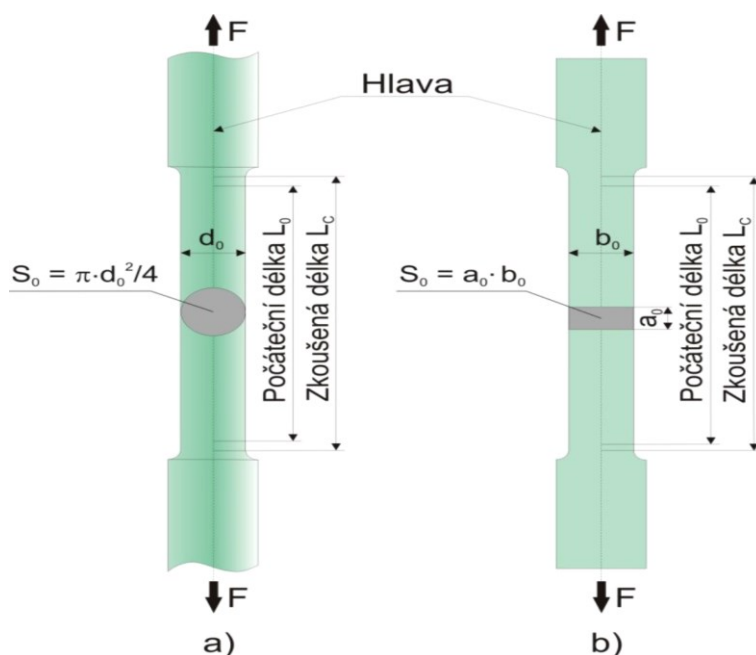
## 3.4. Mechanické zkoušky

### 3.4.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří k základním mechanickým zkouškám. Jedná se o statickou zkoušku, při které se zkušební těleso ve zkušebním stroji zatěžuje tahovou silou předepsanou rychlostí, většinou do přetržení. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly  $F$  (N) na absolutním prodloužení  $\Delta L$  (mm). Zkouší se obvykle při zkušební teplotě 20°C, ale dle požadavků nebo podle norem za teplot vyšších nebo nižších [20].

Na zkušebním tělese, nejčastěji kruhového průřezu je vyznačena tzv. počáteční měřená délka  $L_0$ . Zkušební tělesa mohou mít kruhový nebo čtvercový průřez. Příklady

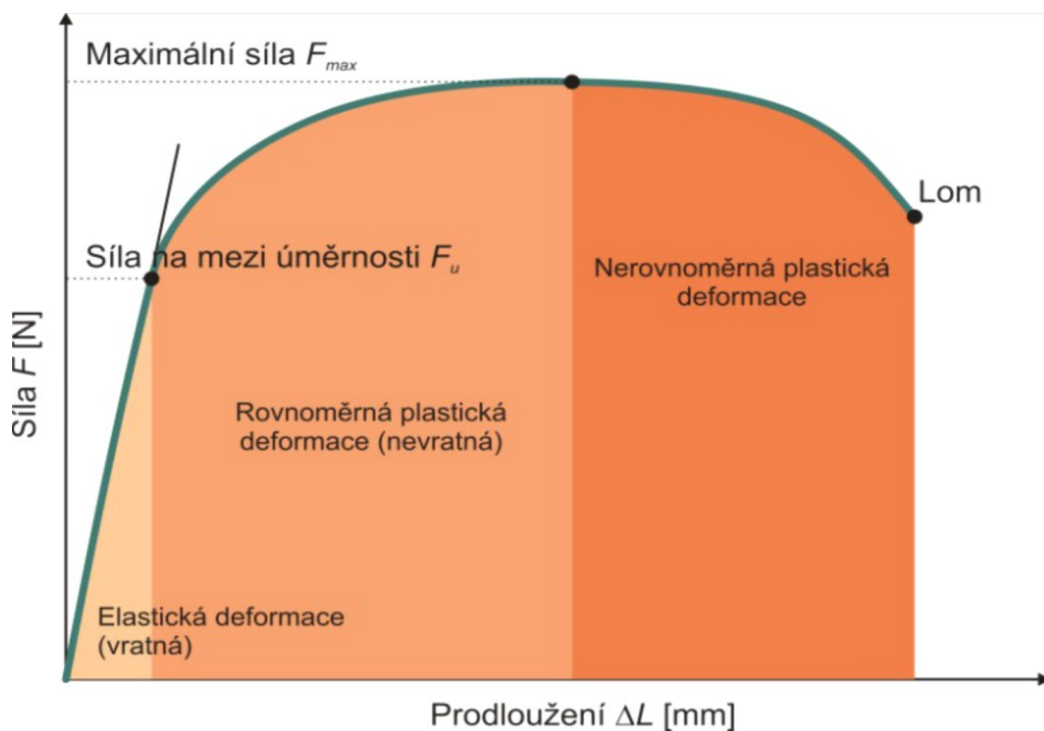
použití zkušebních tyčí pro tělesa kruhového nebo obdélníkového průřezu jsou zobrazeny na **obrázku č. 17** [20].



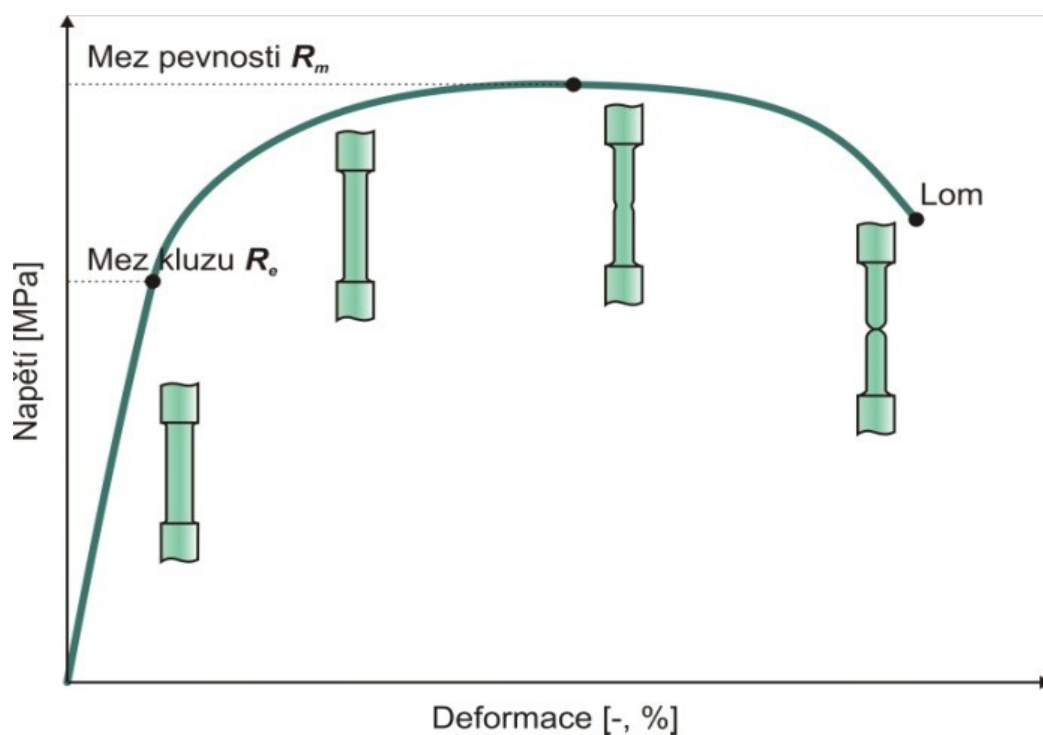
**Obr. 17.** Příklad zkušebních tyčí pro zkoušku tahem a) tyč kruhového průřezu, b) tyč obdélníkového průřezu

Účinkem síly  $F$  se zkušební tyč prodlužuje a mění se tedy počáteční měřená délka  $L_0$  na  $L_1$  o úsek  $\Delta L$  a současně se zmenšuje původní průřez  $S_0$  na okamžitý  $S'$ . V tahové tyči vzniká tahové napětí  $\sigma$ , které je označováno jako skutečné napětí [20].

Výsledkem zkoušky je tahový diagram, který můžeme rozdělit do několika částí. První tvoří oblast elastické (pružné, vratné) deformace, kdy se zkušební tyč v tomto úseku deformuje přímo úměrně se vzrůstající silou zatěžování. Pokud bychom v tomto úseku zkušební tyč odlehčili, vrátí se zpět na svou původní délku. Druhou tvoří oblast rovnoměrně plastické deformace, kdy se dislokace po překročení meze kluzu začnou v materiálu pohybovat, dojde ke vzniku nových dislokací a materiál se začne trvale deformovat. Třetí stádium tvoří oblast nerovnoměrně plastické deformace, kde dochází k poklesu smluvního napětí a na tahové zkoušce se začne vytvářet defekt. Materiál se buď zcela, nebo částečně poruší a dochází k tvorbě tzv. krčku. Tato oblast končí přetržením zkušební tyče. Na **obrázku č. 18** jsou zobrazeny jednotlivé oblasti deformace. Deformace tahové zkušební tyče je zobrazena na **obrázku č. 19** [20].



Obr. 18. Pracovní diagram tahové zkoušky



Obr. 19. Deformace tahové zkušební tyče během zatěžování

U tahové zkoušky zjišťujeme tyto charakteristiky:

- **mez kluzu ( $R_e$ )**: můžeme jej zjednodušeně definovat jako maximální napětí, do něhož se materiál deformuje vratně. U kovových materiálů platí, že do meze kluzu

nedochází k pohybu dislokací. Vypočte se jako podíl zatěžující síly a počáteční plochy příčného průřezu[20].

- **pevnost**: odpovídá maximálnímu zatížení při tahové zkoušce. Označujeme jej jako  $R_m$ . Je to napětí, kdy v materiálu ještě nevznikají defekty a nedochází k rozvoji porušení. Pevnost počítáme podle **rovnice č. 20** [20]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (20)$$

kde  $F_m$  – je největší napětí, které předchází porušení tyče;

$S_0$  – je průřez zkušební vzorku

- **tažnost**: je maximální poměrné plastické (trvalé) prodloužení vyjádřené v %. Označuje se  $A$ . Tažnost se počítá podle **rovnice č. 21** [20]:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (21)$$

kde  $L_0$  – je původní měřená délka;

$L_u$  – je délka měřeného úseku po přetržení.

- **kontrakce**: neboli zúžení vyjadřuje maximální poměrné zúžení po přetržení zkušební tyče v %. Vztah pro výpočet kontrakce je uveden v **rovnici č. 22** [20]:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (22)$$

kde  $S_0$  – je původní průřez tyče v  $\text{mm}^2$ ;

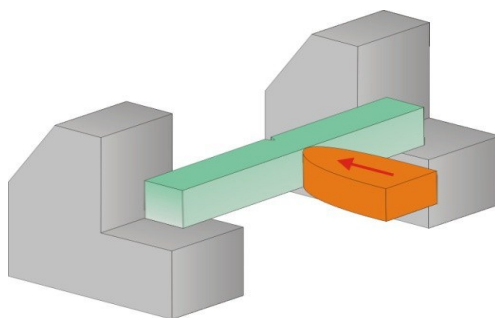
$S_u$  – je minimální průřez tyče v místě po přetržení v  $\text{mm}^2$ .

Mez kluzu a pevnost mají tedy charakter napětí, tažnost a kontrakce jsou veličiny bezrozměrné, uvádějí se tedy v procentech. Tahové zkoušky předložené práce budou vyrobeny dle platné normy ASTM A370, kde vzorky pro tloušťku stěny do 12,5 mm budou obdélníkové o velikost 250 mm a vzorky nad tloušťku stěny 12,5 mm budou kruhové o velikosti 200 mm [20; 21].

### 3.4.2 Zkouška rázem v ohybu

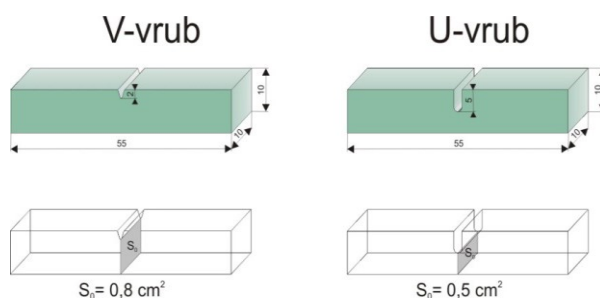
Zkouška rázem v ohybu patří mezi dynamické zkoušky a je základní zkouškou pro stanovení houževnatosti u kovových materiálů. Houževnatost materiálů závisí velmi významně na teplotě, přičemž se dá obecně říci, že houževnatost materiálu klesá s klesající teplotou. Tento pokles houževnatosti je však významně závislý na typu krystalové mřížky. U kovů s mřížkou kubickou plošně centrovanou (fcc – face centered cubic) je pokles houževnatosti při klesající teplotě jen mírný a materiály s touto krystalovou mřížkou zůstávají houževnaté i za nízkých teplot. Vše je způsobeno vyšší mírou symetrie této mřížky, což má za následek, že pohyb dislokací je v této mřížce snadnější. Naproti tomu u kovů s mřížkou bcc (body centered cubic) dochází při poklesu teploty k náhlému poklesu houževnatosti v určitém teplotním intervalu. Za nízkých teplot se materiál chová výrazně křehce [20].

Zkouška rázem v ohybu je založena na zjištění, kolik energie se při úderu spotřebuje na přeražení zkušební tyče ohybem. Nejčastěji využívanou zkouškou je Charpyho metoda. Podstatou této zkoušky je přeražení zkušební tyče opatřené jednostranným vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva. Výsledkem zkoušky je zjištění nárazové práce  $K$  (J), která vyjadřuje energii spotřebovanou na deformaci tělesa k šíření lomu tělesem. Umístění zkušebního tělesa na opěrách je znázorněno na **obrázku č. 20** [20].



**Obr. 20.** Umístění zkušební tyče na opěrách kyvadlového kladiva

Zkušební tělesa pro zkoušku rázem podle Charpyho jsou normována o velikosti 55 mm. Zkušební tělesa jsou opatřena vrubem „V“ o hloubce 2 mm nebo vrubem „U“ o hloubce nejčastěji 5 mm. Podle typu vrubu se zkouška označuje KV s V vrubem nebo KU s vrubem U. Zkušební tělesa s „V“ nebo „U“ vrubem jsou znázorněna na **obrázku č. 21** [20].



**Obr. 21.** Tvar a rozměry zkušebních těles s „V“ nebo „U“ vrubem

Nárazovou práci lze také přepočítat na vrubovou houževnatost KCV nebo KCU, opět podle typu vrubu. Výpočet vrubové houževnatosti je znázorněn v **rovnici č. 23** [20]:

$$KC = \frac{K}{S_0} \quad (23)$$

Kde  $K$  – je nárazová práce v J;

$S_0$  – je plocha pod vrubem v  $\text{cm}^2$ .

Při zkoušce rázem se dále vyhodnocuje podíl křehkého lomu a deformační charakteristika [20].

### 3.5 Cíle práce

Cílem této práce je zmapování mechanických a mikrostrukturních vlastností oceli značky S355J2H. Dále je snaha o to zjistit jak se daná ocel chová vlivem změny teploty doválcování na poutní stolici. Tyto parametry nebyly dosud na provozu válcovna trub zkoumány.

Hledání výše uvedených parametrů bylo realizováno změnou doválcovacích teplot a to zhruba o 50 – 70°C nižších než je standardní doválcovací teplota stanovená v technologických předpisech. Experiment byl veden tak, aby minimální teplota doválcování nepodkročila hodnotu 900°C. Válcování pod touto uvedenou teplotou nese významné riziko lomu poutních válců, což může mít za následek až několika hodinový prostoj ve výrobě. Pro lepší orientaci ve výsledcích zkoušek je trubka odválcována za snížených teplot označena (<T) a trubka odválcována za standardních teplot je označena (= T).

### 3.6 Zkoumaná ocel S355J2H

Jedná se o ocel odlévanou v TŽ, a.s. dle normy EN 10210-1. Pro experimentální účely byla vybrána klasická tavba T18848, která je se svým chemickým složením běžné odlévanou tavbou. Chemické složení této tavby je uvedeno v **tabulce č. 1**.

**Tab. 1.** Chemické složení tavby T18848 v hm. %

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
0,17	1,15	0,2	0,015	0,004	0,03	0,19	0,03	0,03	0,01	0,035

### 3.7 Popis experimentu

Válcování probíhalo na poutní stolici válcovací tratě Velký Mannesmann, přičemž experiment byl prováděn na šesti trubkách s různými teplotami doválcování. Válcování proběhlo v jedné kampani, tudíž byly zachovány stejné podmínky jak v případě děrování, tak i následného válcování na poutní stolici. Jako vsázkový materiál byl zvolen Ø 410 mm, do válcovaného kalibru Ø 288 mm a „hotovního“ Ø 273 mm. Zvoleny byly tloušťky stěn 10, 30 a 60 mm. V těchto tloušťkách stěn byly odválcovány vždy dva kusy trubek, z nichž první trubka byla odválcována za snížených teplot a druhá za teplot standardních. Snížená teplota doválcování byla zajištěna tak, že po vyděrování vsázky na děrovacím stroji a nasunutí poutního trnu byl vyděrovaný předvalek ponechán na valnici před vstupem do poutní stolice – teplota byla měřena ručním pyrometrem. Ze všech trubek po odválcování byly nejprve z obou konců uřezány na traťové pile za tepla nehomogenní konce o velikosti cca 300 mm a až následně byly uřezány vzorky pro mechanické zkoušky.

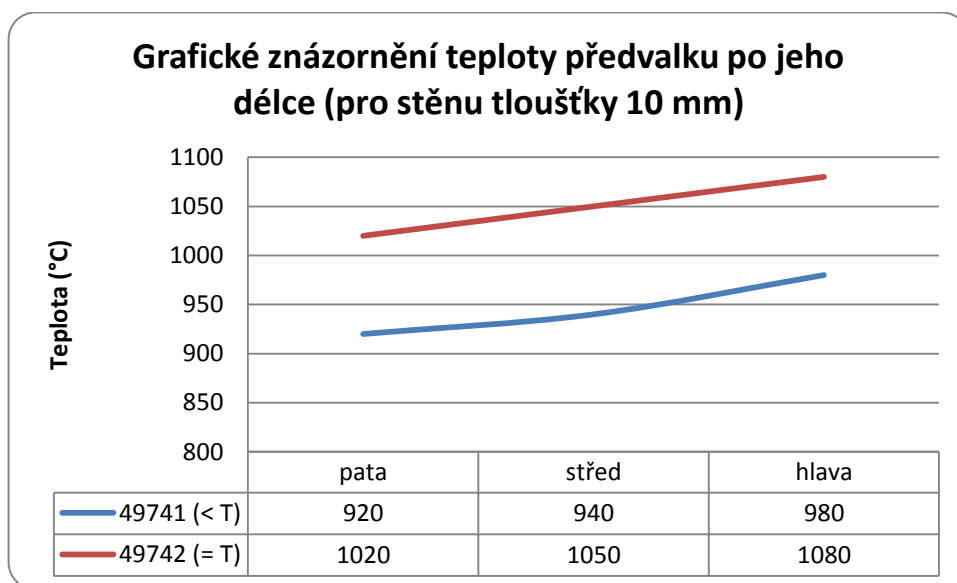
Poté trubky postupovaly dále technologickým tokem a po zchlazení pod teplotu 550 °C byly nasazeny do ohřívací krokové pece, kde byly podrobeny ohřevu na předem stanovený čas a teplotu. Následně byly trubky kalibrovány na konečný Ø 273 mm a ochlazeny řízeným ochlazováním sedmi řadami sprch pod teplotu 450 °C. Po vyrovnání na traťovém rovnacím stroji byla z trubek na úpravně odebrána sada dalších vzorků pro zkoušky mechanických vlastností. Pro trubky stěny 10 mm se jednalo o vzorky délky 250 mm, pro trubky stěny 30 a 60 mm o vzorky délky 200 mm.

#### 3.7.1 Válcování trubek tloušťky stěny 10 mm

První trubka stěny 10 mm, která byla odválcována za snížených teplot je označena číslem trubky č. 49741. Druhá experimentální trubka odválcovaná za standardních podmínek je označena číslem č. 49742. Snímány byly teploty patního konce, který vstupuje do poutní stolice jako první, středu vyděrovaného předvalku a hlavové části předvalku, u které proces poutního válcování končí. Stěžejní teploty a časy zpracování obou těchto zkoumaných trubek jsou uvedeny v **tabulce č. 2**. Na **obrázku č. 22** je grafické porovnání teplotních záznamů vyděrovaných předvalků před zahájením válcování trubek tloušťky stěny 10 mm.

**Tab. 2.** Teploty a časy zpracování trubky č. 49471 a č. 49472

	č. 49741 (< T)	č. 49742 (= T)
délka ohřevu v karuselové peci (min.)	383	385
teplota předvalku (°C) - pata	920	1020
teplota předvalku (°C) - střed	940	1050
teplota předvalku (°C) - hlava	980	1080
nejvyšší změřená teplota před vstupem do krokové pece (°C)	225,7	258,9
nejvyšší změřená teplota na výstupu z krokové pece (°C)	904,7	898,7
délka ohřevu v krokové peci (min.)	41	41
délka řízeného ochlazování (min.)	21	20
nejvyšší změřená teplota po řízeném ochlazování (°C)	< 250	< 250

**Obr. 22.** Grafické znázornění teploty předvalku po jeho délce před zahájením válcování

### 3.7.2 Válcování trubek tloušťky stěny 30 mm

Princip značení obou experimentálních kusů u stěny 30 mm je totožný jako v předchozím případě. Trubka odválcovaná za snížených teplot je označena číslem č. 49824, standardní trubka poté číslem č. 49825. Snímány byly opět teploty patního konce, který vstupuje do poutní stolice jako první, středu vyděrovaného předvalku a hlavové části předvalku. Naměřené teploty a časy zpracování obou těchto zkoumaných trubek jsou

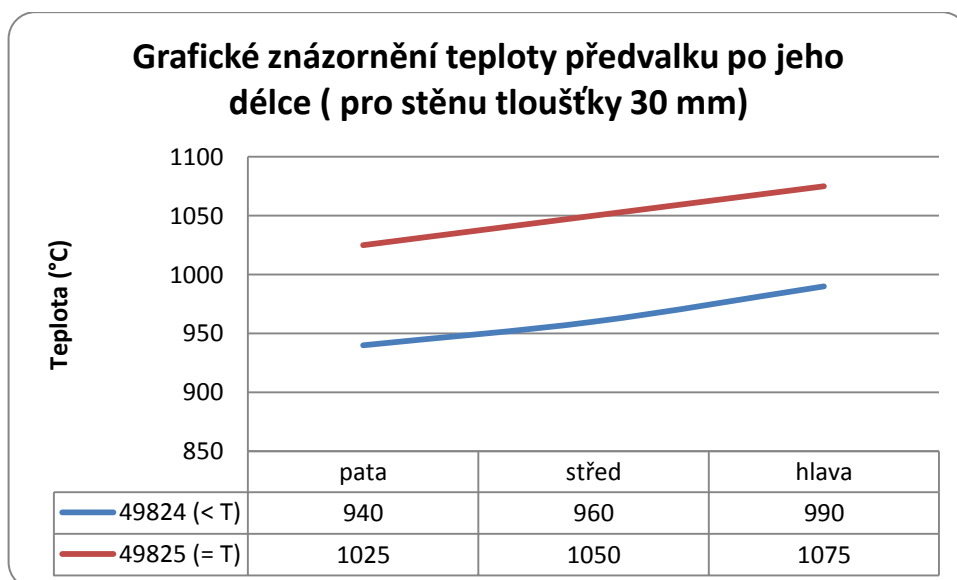
Squerzi, M. *Vliv teplotně deformačních podmínek na strukturu a mechanické vlastnosti bezešvých trubek*. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2015.



uvedeny v **tabulce č. 3**. Na **obrázku č. 23** je graficky znázorněn teplotní záznam vyděrovaného předvalku před zahájením válcování trubek tloušťky stěny 30 mm.

**Tab. 3.** Teploty a časy zpracování trubky č. 49824 a č. 49825

	č. 49824 (< T)	č. 49825 (= T)
délka ohřevu v karuselové peci (min.)	391	388
teplota předvalku (°C) - pata	940	1025
teplota předvalku (°C) - střed	960	1050
teplota předvalku (°C) - hlava	990	1075
nejvyšší změřená teplota před vstupem do krokové pece (°C)	393,6	375,5
nejvyšší změřená teplota na výstupu z krokové pece (°C)	916,9	920,1
délka ohřevu v krokové peci (min.)	67	71
délka řízeného ochlazování (min.)	45	47
nejvyšší změřená teplota po řízeném ochlazování (°C)	324,1	347,2



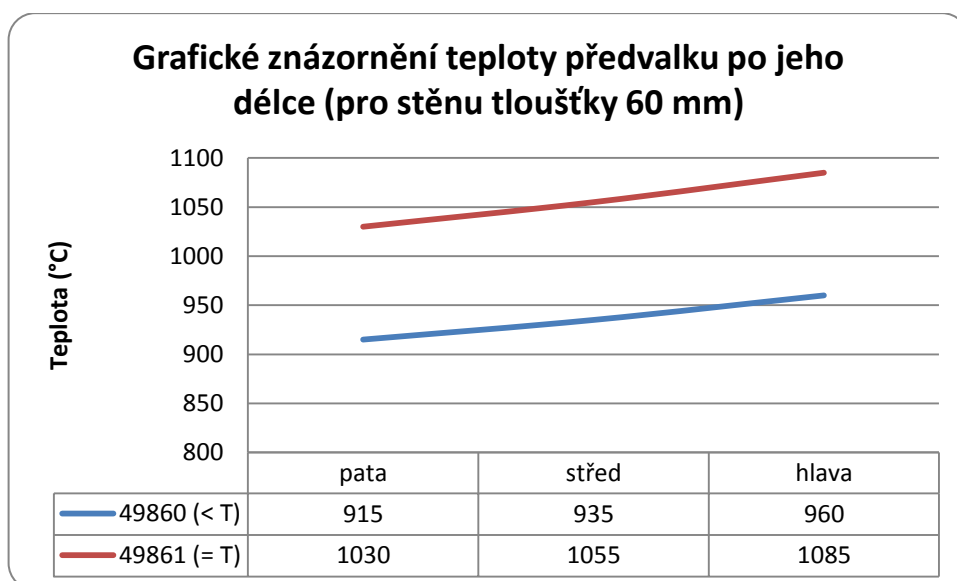
**Obr. 23.** Grafické znázornění teploty předvalku po jeho délce před zahájením válcování

### 3.7.3 Válcování trubek tloušťky stěny 60 mm

Také u trubek stěny 60 mm bylo značení obou kusů provedeno totožným způsobem jako v předchozích dvou případech. První trubka válcovaná za snížených teplot je označena číslem č. 49860, následující standardní trubka číslem č. 49861. Také snímání patního, hlavového konce a středu předvalku bylo provedeno totožně s tím, že sledované teploty a časy zpracování obou těchto zkoumaných trubek jsou uvedeny v **tabulce č. 4**. Na **obrázku č. 24** je opět graficky znázorněn teplotní záznam vyděrovaného předvalku před zahájením válcování trubek tloušťky stěny 60 mm.

**Tab. 4.** Teploty a časy zpracování trubky č. 49860 a č. 49861

	č. 49860 (< T)	č. 49861 (= T)
délka ohřevu v karuselové peci (min.)	373	382
teplota předvalku (°C) - pata	915	1030
teplota předvalku (°C) - střed	935	1055
teplota předvalku (°C) - hlava	960	1085
nejvyšší změřená teplota před vstupem do krokové pece (°C)	473,6	499,6
nejvyšší změřená teplota na výstupu z krokové pece (°C)	919,6	918,7
délka ohřevu v krokové peci (min.)	91	87
délka řízeného ochlazování (min.)	67	64
nejvyšší změřená teplota po řízeném ochlazování (°C)	327,5	347,2



**Obr. 24.** Grafické znázornění teploty předvalku po jeho délce před zahájením válcování

### 3.8 Zkoušení mechanických vlastností

Ze šesti trubek, které byly pro tuto experimentální část zvoleny, byly odebrány za poutní stolicí, před vstupem trubek do dohřívací krokové pece. Tyto vzorky byly odebírány z patního a hlavového konce, z nichž se připravila zkušební tělíska pro zkoušení mechanických vlastností a nárazové práce. Fotografie takto uřezaných vzorků na poutní stolicí jsou zobrazeny na **obrázcích č. 25 a 26**.



**Obr. 25 a 26.** Vzorky pro zkoušku tahem a rázem odebrány po poutní stolicí

Po odřezu výše uvedených vzorků postupovaly trubky dále do krokové pece, po níž byla odebrána stejná sada pro další zkoušky tahem a rázem. Pro tahovou zkoušku stěny 10 mm byly vyřezány a vyfrézovány ploché vzorky o délce 250 mm, pro stěny tloušťky 30 a 60 mm byly vyřezány a vysoustruženy vzorky o délce 200 mm. Fotografie připravených tělísek pro tahovou zkoušku jsou zobrazeny na **obrázcích č. 27 a 28**.



**Obr. 27 a 28.** Opracované vzorky připravené pro tahovou zkoušku

Pro trubky tloušťky stěny 10mm byly u zkoušek rázem zvoleny zkušební vzorky rozměru 7,5 x 10 x 55 mm. V případě trubek stěny 30 a 60 mm byly rozměry zkušebních vzorků 10 x 10 x 55 mm. Odběr vzorků – směr vláken byl u všech vzorků stejný, tedy příčný. Vrub byl zvolen "V".

Zkoušky tahem byly provedeny za pokojové teploty. U zkoušek rázem byly zvoleny tři zkušební teploty 0°C, -20°C a -40°C. Všechny potřebné zkoušky byly provedeny v akreditované zkušebně Enviform, a.s. Pomocí těchto zkoušek byly stanoveny hodnoty meze kluzu [MPa], pevnosti [MPa], tažnosti [%] a nárazové práce [J].

#### 4. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek odebraných po válcování před ohřevem v krokové peci

U zkoumané oceli S355J2H se klade velký důraz na výsledky mechanických zkoušek, zejména pak na hodnoty meze kluzu (Re) a pevnosti (Rm). Mezi další významné parametry patří zkouška nárazové práce, kde minimální hodnota při zkušební teplotě -20°C je 27 J. Za číslem trubky je uveden také index, označující místo odběru vzorku pro zkoušku tahem a rázem. Pro patní část trubky byl zvolen index /P, pro hlavovou část trubky byl zvolen index /H. Z roztržených tělísek tahové zkoušky byly provedeny metalografické rozborů, jejichž výsledky velikosti zrna jsou vedeny v **tabulce č. 5**. Hodnocena byla velikost sekundárního zrna dle normy ASTM E112.

**Tab. 5.** Hodnocení velikosti zrna vzorků po tahové zkoušce před ohřevem v krokové peci

číslo trubky	velikost sekundárního zrna dle ASTM E112	
	ferit	perlit, bloky
49741/H (< T)	8	8
49741/P (< T)	9	9
49742/H (= T)	8	8
49742/P (= T)	9	9
49824/H (< T)	7	7
49824/P (< T)	7,5	7,5
49825/H (= T)	8	8
49825/P (= T)	7	7
49860/H (< T)	6,5	6,5
49860/P (< T)	7	7
49861/H (= T)	6	6
49861/P (= T)	6	6

##### 4.1 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 10 mm

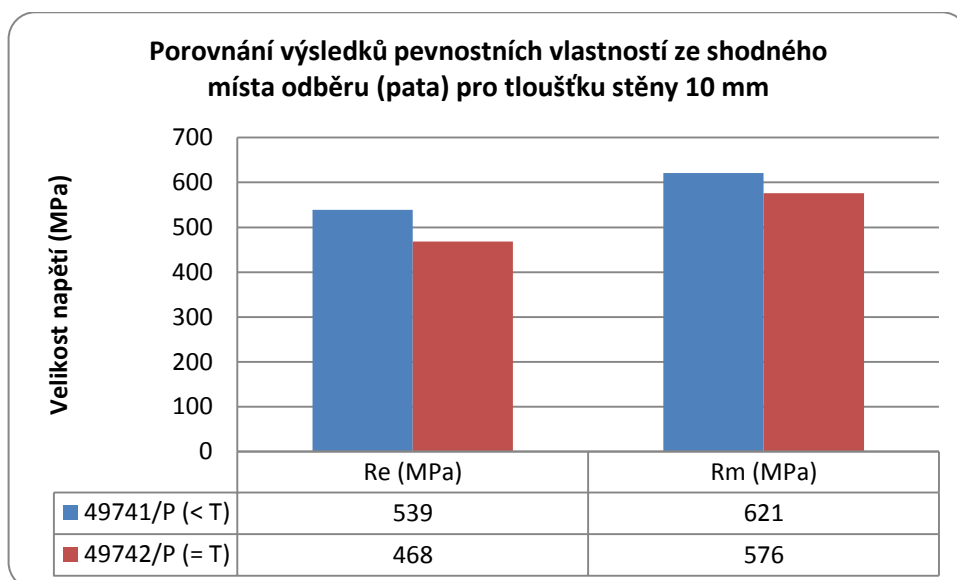
Zjištěné hodnoty meze kluzu (Re), pevnosti (Rm), tažnosti (A5) a kontrakce (Z), trubky č. 49741, která byla odválcována za snížených teplot a trubky č. 49742, která byla odválcována za standardních teplot jsou uvedeny v **tabulce č. 6**. Výsledky nárazové práce jsou uvedeny v **tabulce č. 7**.

**Tab. 6.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 10 mm

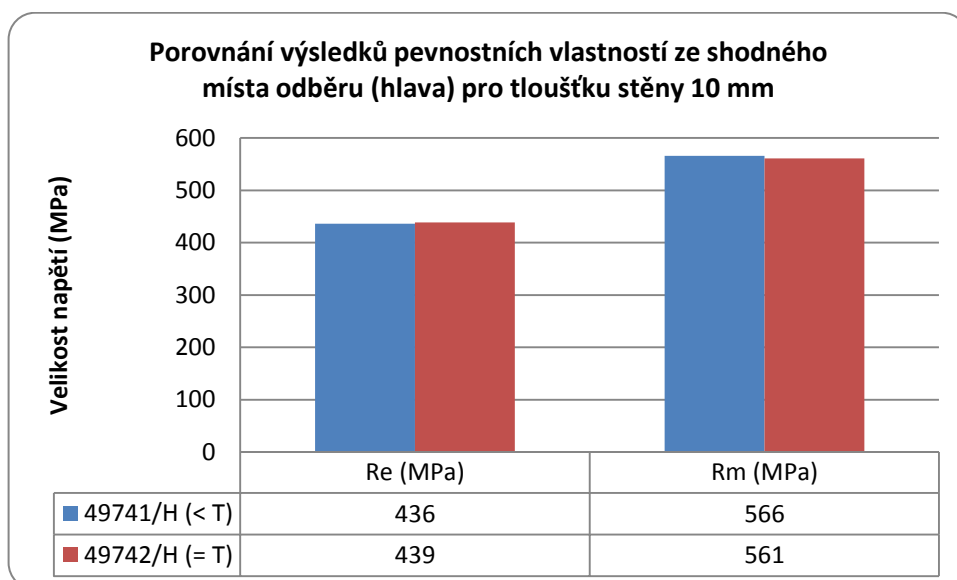
č. trubky	Re (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	Z (%)
49741/P(< T)	539	621	24,9	63,69
49741/H(< T)	436	566	25,9	62,59
č. trubky	Re (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	Z (%)
49742/P (= T)	468	576	24,4	60,52
49742/H (= T)	439	561	27	61,75

Z výsledků mechanických vlastností zkoušky tahem pro stěnu 10 mm je patrné, že při srovnání místa odběru, to znamená pata nebo hlava trubky, jsou hodnoty meze kluzu (Re) a pevnosti (Rm) vyšší u trubky s nižší doválcovací teplotou, než u běžně odválcované trubky. Největší rozdíl je patrný zejména u patního konce trubek, kde rozdíl v mezi kluzu Re je 71 MPa a v pevnosti 45 MPa ve prospěch trubky s nižší doválcovací teplotou.

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 29 a č. 30**.



**Obr. 29.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



**Obr. 30.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

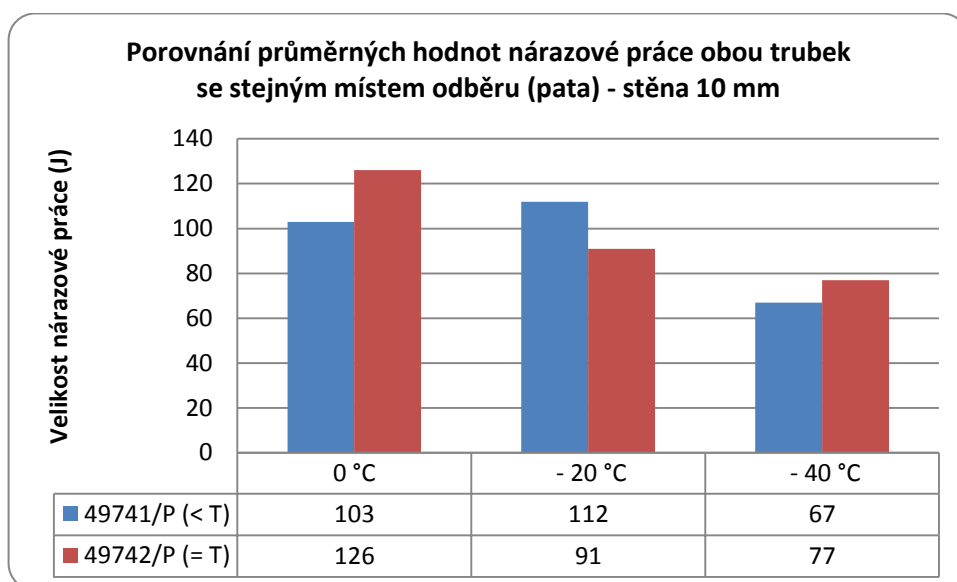
Výsledky nárazové práce u těchto dvou trubek lze považovat za takřka totožné. Avšak v jednom případě a to konkrétně u trubky 49742/H byly výsledky dvou, ze tří tělísek v sadě u teploty -40 °C pod minimální požadovanou hodnotu 27J. Tato sada zkoušek

dopadla ve srovnání s ostatními výsledky u této stěny nejhůře a je nutno podotknout, že se jednalo o trubku válcovanou za standardních podmínek.

**Tab. 7.** Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 10 mm

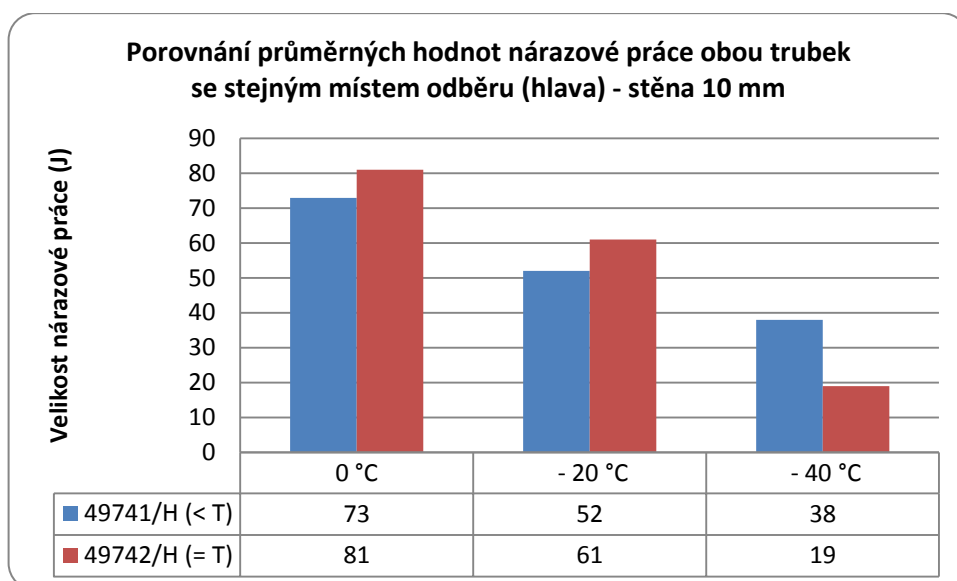
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49741/P (< T)	T	0	95	120	95	103
49741/P (< T)	T	-20	125	125	85	112
49741/P (< T)	T	-40	60	73	68	67
49741/H (< T)	T	0	78	69	73	73
49741/H (< T)	T	-20	59	45	52	52
49741/H (< T)	T	-40	36	37	42	38
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49742/P(= T)	T	0	125	142	112	126
49742/P(= T)	T	-20	102	73	99	91
49742/P(= T)	T	-40	80	74	76	77
49742/H(= T)	T	0	89	76	77	81
49742/H(= T)	T	-20	46	67	69	61
49742/H(= T)	T	-40	30	11	15	19

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 31a č. 32.**



**Obr. 31.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

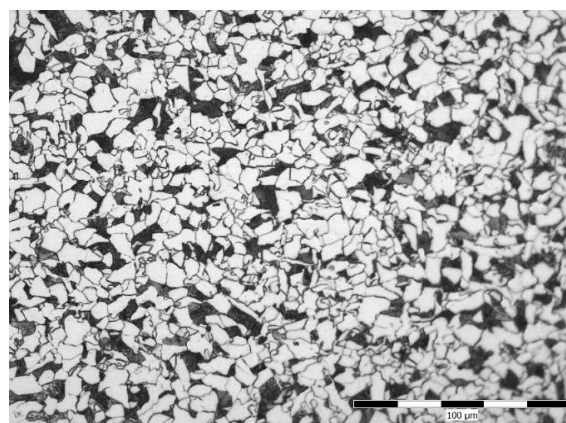
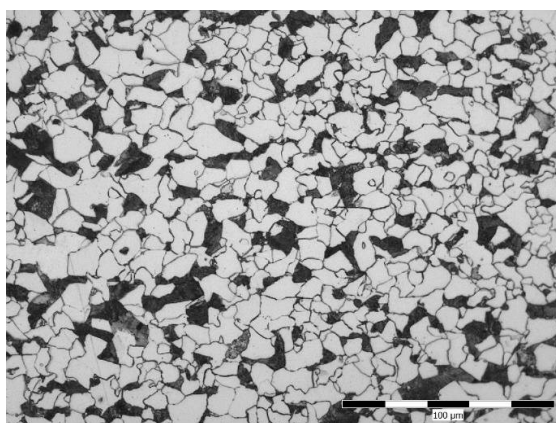




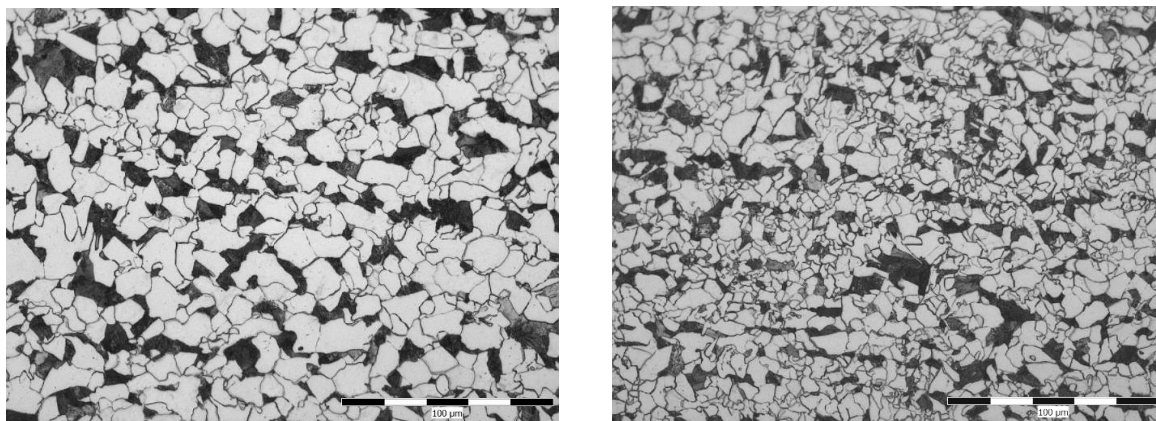
**Obr. 32.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

## 4.2 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 10 mm

Detaily mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 33 a č. 34**, z trubky válcované za standardních teplot je zobrazena na **obrázku č. 35 a č. 36**. Z hlediska hodnocení velikosti zrna nebyl mezi těmito výsledky shledán rozdíl.



**Obr. 33 a Obr. 34.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49741/H a 49741/P)



**Obr. 35 a Obr. 36.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49742/H a 49742/P)

### 4.3 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 30 mm

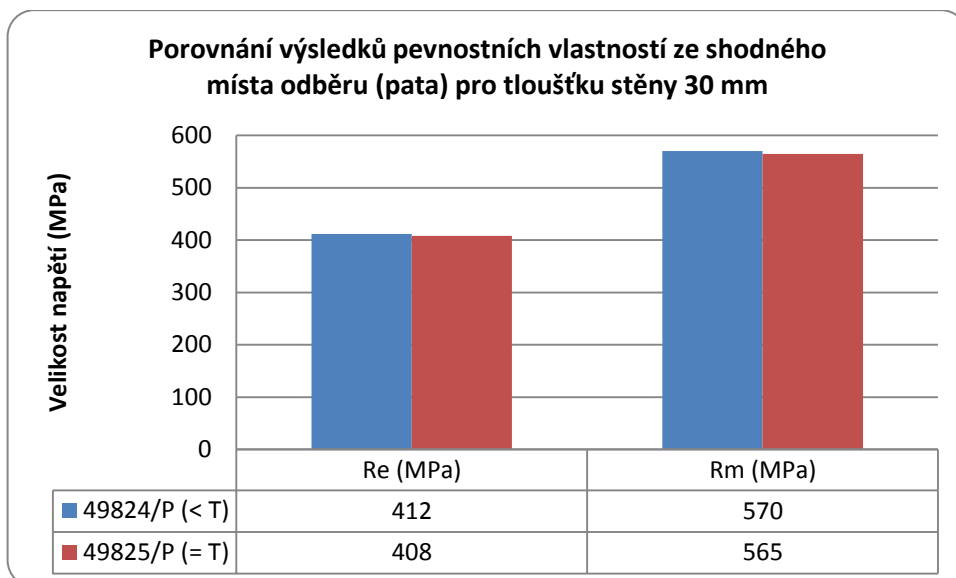
Zjištěné hodnoty meze kluzu ( $R_e$ ), pevnosti ( $R_m$ ), tažnosti ( $A_5$ ) a kontrakce ( $Z$ ), trubky č. 49824 (snížená teplota válcování) a trubky č. 49825 (standardní podmínky) jsou uvedeny v **tabulce č. 8**. Výsledky nárazové práce jsou uvedeny v **tabulce č. 9**.

**Tab. 8.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 30 mm

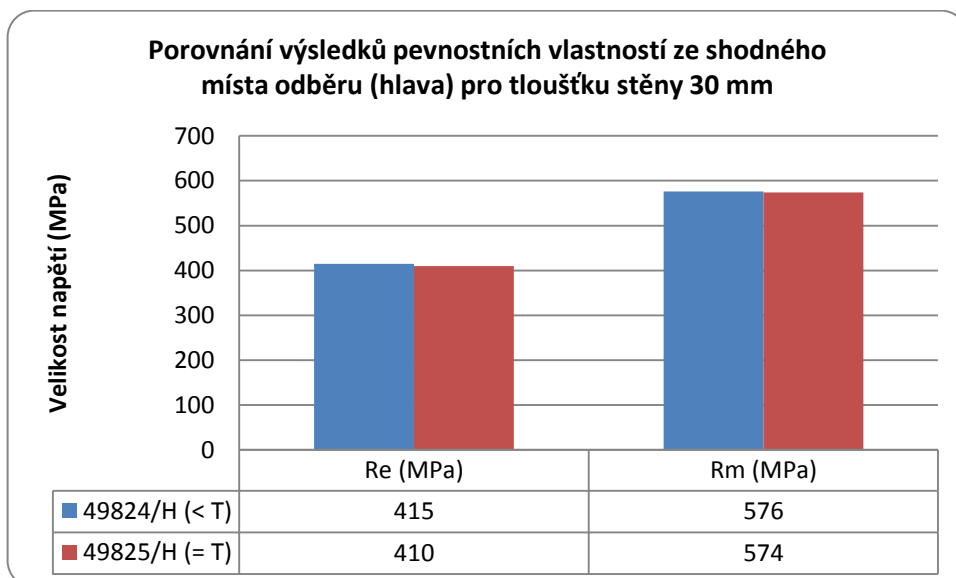
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49824/P(< T)	412	570	27,4	70,72
49824/H(< T)	415	576	29,2	64,07
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49825/P (= T)	408	565	31,8	66,22
49825/H (= T)	410	574	31,4	67,38

Hodnoty tahové zkoušky u stěny 30 mm jsou téměř totožné. Z výsledků lze vyčíst, že parametry meze kluzu ( $R_e$ ) a pevnosti ( $R_m$ ) jsou v rozptylu 10 MPa v porovnání trubky odválcované za snížených a standardních teplot. Můžeme však říci, že výsledky zkoušek jsou nepatrně vyšší u trubky odválcované za nižší teploty doválcování.

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru (pata a hlava je znázorněno na **obrázcích č. 37 a č. 38**.



**Obr. 37.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



**Obr. 38.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

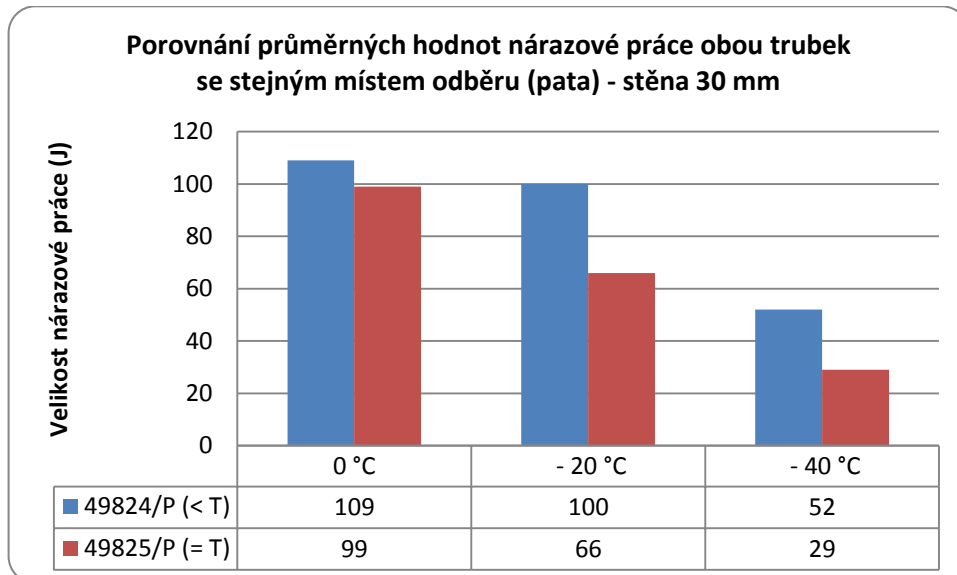
Zkoušky rázem dopadly negativně zejména pro trubku č. 49825, která byla odválcována za standardních podmínek. Zde nebyla splněna minimální hodnota 27 J při teplotě  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  u vzorků odebraných z obou částí trubky. Za vyhovující zkoušku se dle normy pokládá ta, u níž je minimální požadovaná hodnota podkročena maximálně o 30 % (v tomto případě 27 J – 70 % požadované hodnoty je tedy 19 J). Toto pravidlo však platí pouze v případě jednoho ze tří zkušebních vzorků.

Naopak u trubky č. 49824 odválcované za snížených teplot nebyla splněna průměrná hodnota pouze u trubky z hlavové části. Za pozornost stojí výsledky z patní části trubky, kdy všechny tři tělíska dosáhly zajímavé hodnoty 52 J.

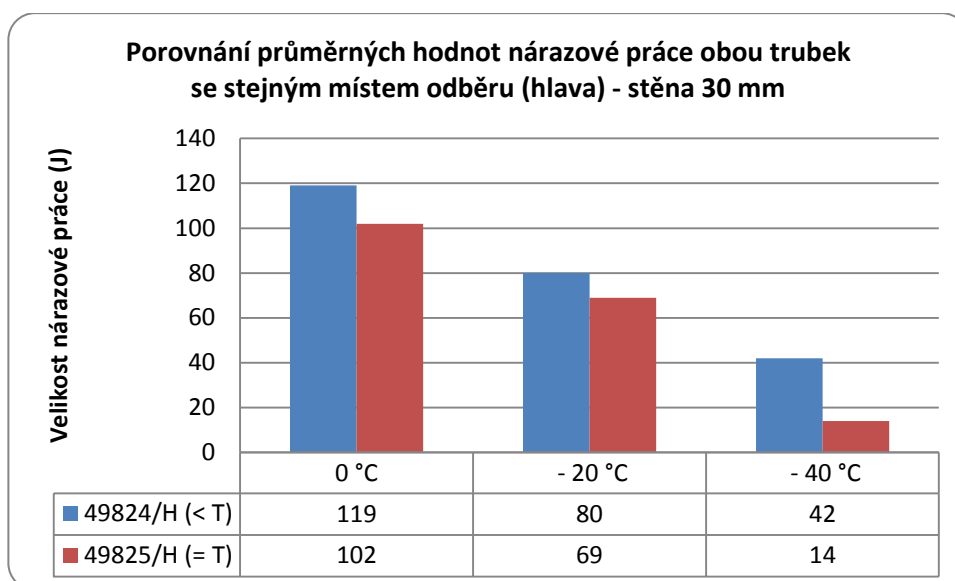
Tab. 9. Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 30 mm

č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49824/P (< T)	T	0	86	131	110	109
49824/P (< T)	T	-20	70	108	121	100
49824/P (< T)	T	-40	52	52	52	52
49824/H (< T)	T	0	123	126	108	119
49824/H (< T)	T	-20	102	67	71	80
49824/H (< T)	T	-40	51	60	15	42
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49825/P (= T)	T	0	90	95	112	99
49825/P (= T)	T	-20	35	58	106	66
49825/P (= T)	T	-40	22	52	12	29
49825/H (= T)	T	0	97	102	106	102
49825/H (= T)	T	-20	56	87	65	69
49825/H (= T)	T	-40	15	10	16	14

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 39 a č. 40**.



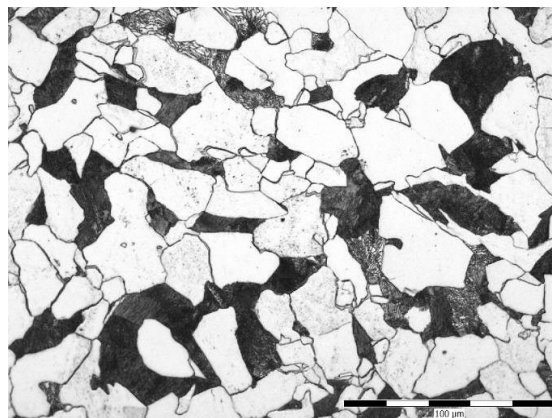
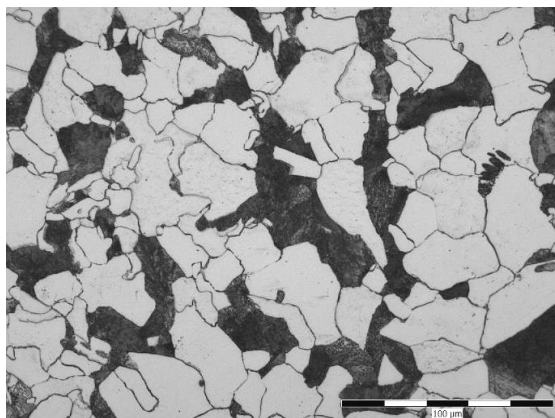
Obr. 39. Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru



**Obr. 40.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

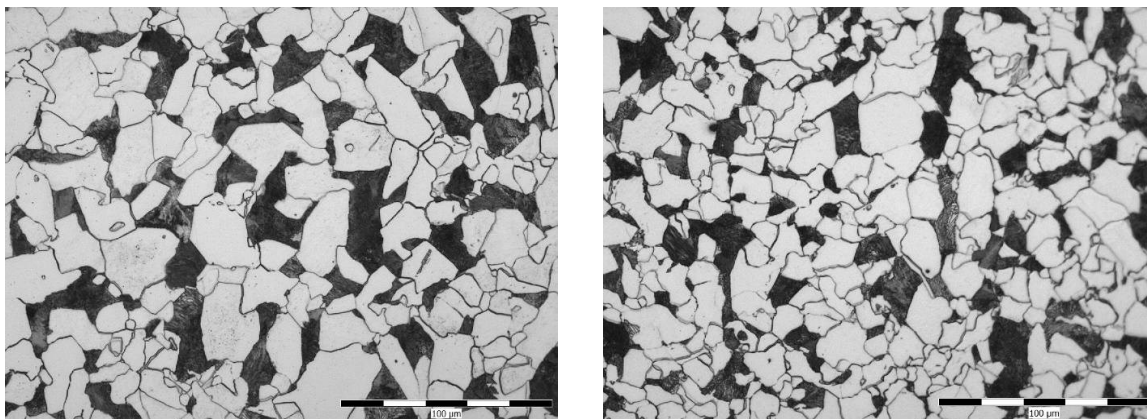
#### 4.4 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 30 mm

Fotografie mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 41 a č. 42**, z trubky válcované za standardních teplot je zobrazena na **obrázku č. 43 a č. 44**. U vzorků válcovaných za nižších teplot doválcování bylo při hodnocení zjištěno jemnější zrno, než u standardně vyválcované trubky.



**Obr. 41 a Obr. 42.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49824/H a 49824/P)





**Obr. 43 a Obr. 44.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49825/H a 49825/P)

#### 4.5 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 60 mm

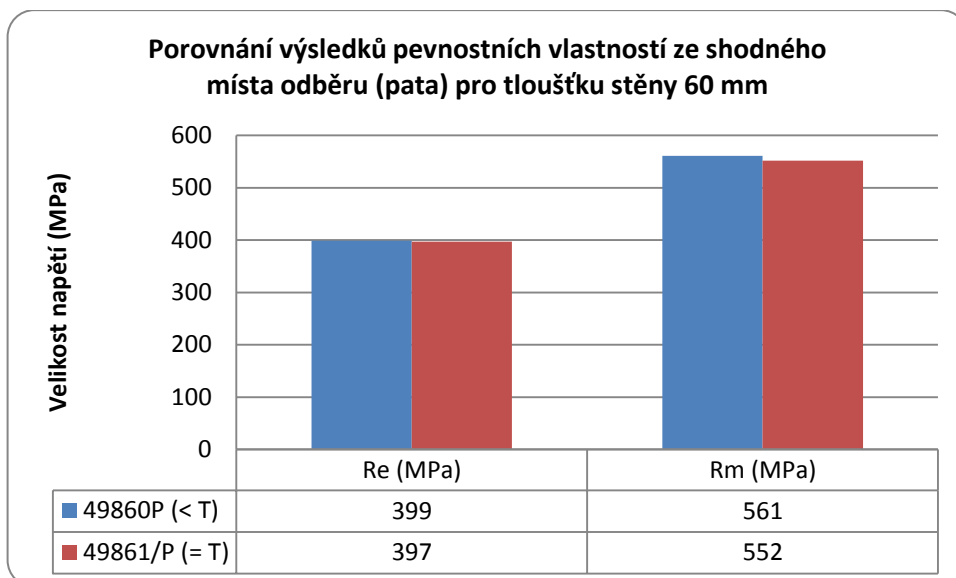
Zjištěné hodnoty meze kluzu ( $R_e$ ), pevnosti ( $R_m$ ), tažnosti ( $A_5$ ) a kontrakce ( $Z$ ), obou experimentálně vyválcovaných trubek (č. 49860 a č. 49861) jsou stejně jako v předchozích dvou případech uvedeny níže v **tabulce č. 10** a výsledky nárazové práce v **tabulce č. 11**.

**Tab. 10.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 60 mm

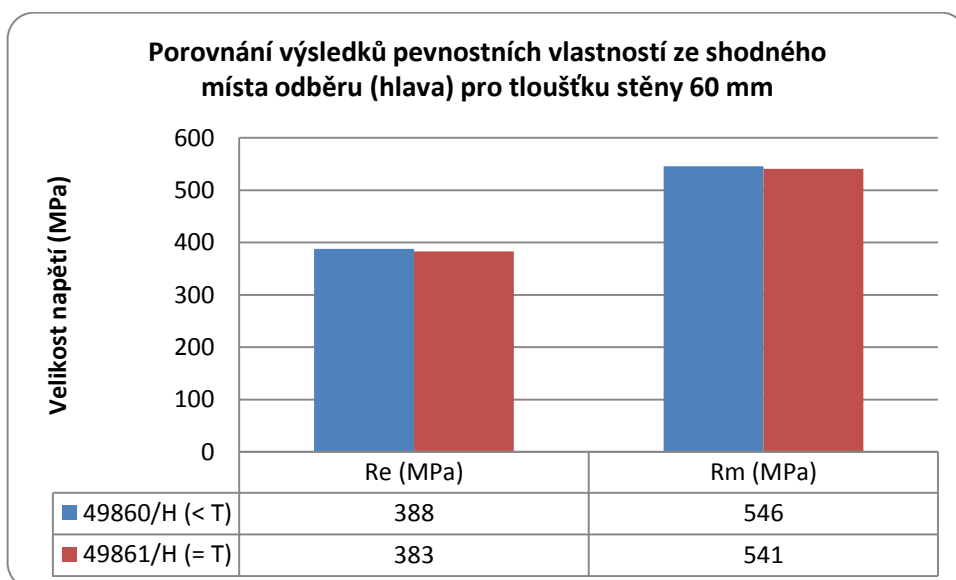
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49860/P(< T)	399	561	30,4	70,84
49860/H(< T)	388	546	30,6	66,36
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49861/P (= T)	397	552	32	62,86
49861/H (= T)	383	541	31,2	69,81

Obdobně jako u stěny tloušťky 30 mm jsou také výsledky tahové zkoušky u stěny 60 mm velmi vyrovnané a rozdíl meze kluzu ( $R_e$ ) a pevnosti ( $R_m$ ) je do 15 MPa – srovnané v rámci místa odběru zkoušky. Opět se však potvrdily nepatrně vyšší dosažené hodnoty u trubky s nižší doválcovací teplotou.

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru pata a hlava je znázorněno na **obrázcích č. 45 a č. 46**.



**Obr. 45.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



**Obr. 46.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

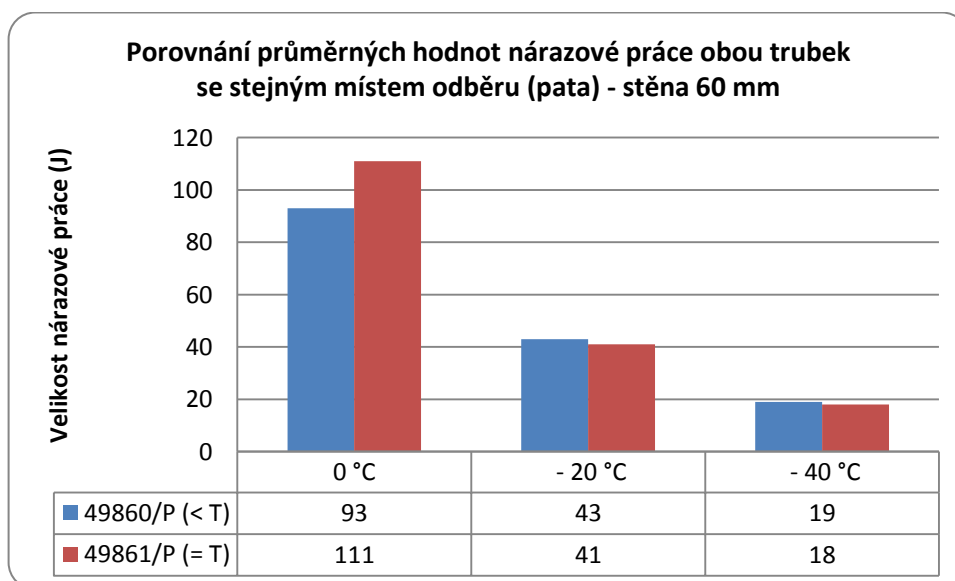
Výsledky nárazové práce u zkušební teploty  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  byly u většiny přeražených tělísek výrazně pod minimální požadovanou hodnotou 27 J. Ani jedna zkouška při této teplotě tedy nemohla být vyhodnocena jako vyhovující. Z tabulky č. 17 také vyplývá, že u trubky č. 49861 (standardní podmínky), rovněž nelze výsledky pokládat za vyhovující ani u zkoušek prováděných za teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V obou případech (hlava i pata trubky) totiž došlo u této teploty k výraznému podkročení minimální požadované hodnoty 27 J. Naopak u trubky č. 49860, odválcované za snížených teplot byly všechny výsledky nárazové práce u zkušební teploty  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  nad 27 J a to dosti výrazně.

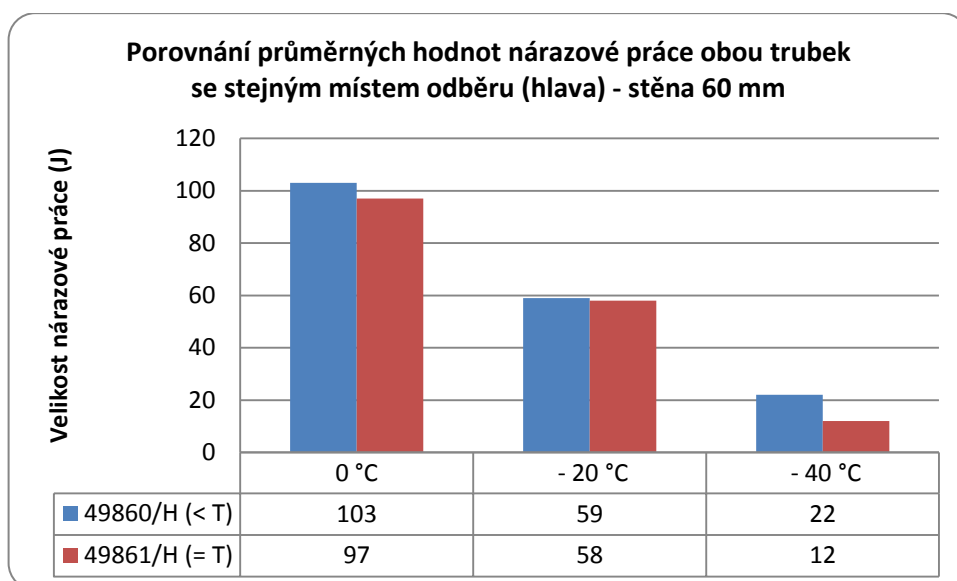


**Tab. 11.** Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 60 mm

č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49860/P (< T)	T	0	92	124	63	93
49860/P (< T)	T	-20	40	38	50	43
49860/P (< T)	T	-40	14	27	16	19
49860/H (< T)	T	0	123	65	122	103
49860/H (< T)	T	-20	91	40	47	59
49860/H (< T)	T	-40	16	34	16	22
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49861/P(= T)	T	0	112	121	101	111
49861/P(= T)	T	-20	18	53	63	41
49861/P(= T)	T	-40	22	10	21	18
49861/H(= T)	T	0	105	109	76	97
49861/H(= T)	T	-20	12	82	81	58
49861/H(= T)	T	-40	14	8	14	12

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 47 a č. 48**.

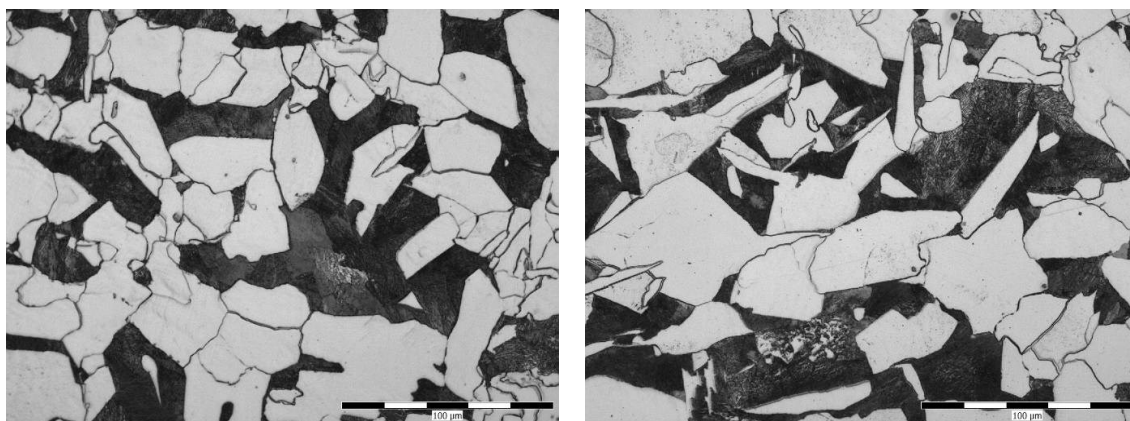
**Obr. 47.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru



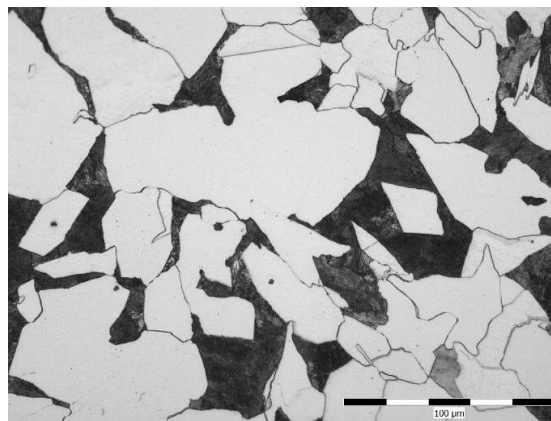
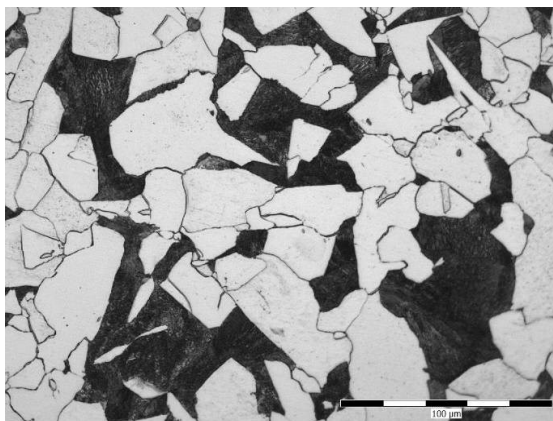
**Obr. 48.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběr

#### 4.6 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 60 mm

Fotografie mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 49 a č. 50**, z trubky válcované za standardních teplot je zobrazena na **obrázku č. 51 a č. 52**. U vzorků válcovaných za nižších teplot doválcování bylo při hodnocení zjištěno jemnější zrno, než u trubky válcované za standardních teplot.



**Obr. 49 a Obr. 50.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49860/H a 49860/P)



**Obr. 51 a Obr. 52.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49861/H a 49861/P)

## 5. Vyhodnocení mechanických a metalografických zkoušek odebraných po ohřevu v krokové peci

Po odválcování a odběru vzorků postupovaly trubky dále technologickým tokem výroby do ohřívací krokové pece. Toto zařízení plní v technologickém toku VM dvě důležité funkce, z nichž první je ohřev a druhá výdrž na normalizační teplotě. Tato technologie dokáže zajistit zjemnění zrna po válcování a tím zlepšení mechanických vlastností, zejména pak nárazové práce a také dostatečný ohřev trubek před kalibrací na finální průměr.

Po rekonstrukci a modernizaci válcovací tratě v roce 2008 byl pracovníky technologie provozu zaveden postup, který musí být z hlediska dosažení požadovaných mechanických vlastností dodržen. Tento způsob se osvědčil, natolik, že je využíván dodnes. Teploty a časy v krokové peci jsou popsány v **tabulce č. 12** [7].

**Tab. 12.** Doby a teploty ohřevu v krokové peci dle tloušťky stěny trubky

<i>Tloušťka stěny (mm)</i>	<i>Celkový pobyt v peci (min.)</i>	<i>Rozsah teplot trubek při výstupu z krokové pece (°C)</i>
6,3 - 10	30 - 40	890 - 910
10,1 - 16	40 - 50	890 - 910
16,1 - 23,0	50 - 60	900 - 920
23,1 - 30	55 - 70	900 - 920
30,1 - 36	65 - 80	900 - 920
36,1 - 45	70 - 90	900 - 920
45,1 - 60	80 - 100	900 - 930

Kombinace teploty ohřevu v krokové peci a pobyt trubek pod ochlazovacím zařízením sprch, po ověřenou dobu, zajistí dosažení požadovaných hodnot meze kluzu, pevnosti, tažnosti a hodnoty nárazové práce.

Obdobně jako u metalografického rozboru před ohřevem trubek v krokové peci, byly také z tělísek tahové zkoušky po ohřevu trubek v krokové peci provedeny metalografické rozboru. Hodnocení velikosti zrna dle normy ASTM E112 jsou uvedeny v **tabulce č. 13**. Vlivem ohřevu v krokové peci a následného řízeného ochlazení došlo k vyrovnání struktury, co se týče velikosti zrn, v rámci jednotlivých stěn.

**Tab. 13.** Hodnocení velikosti zrna vzorků po tahové zkoušce po ohřevu v krokové peci

číslo trubky	velikost sekundárního zrna dle ASTM E112	
	ferit	perlit. bloky
49741/H (< T)	9	9
49741/P (< T)	9.5	9.5
49742/H (= T)	9	9
49742/P (= T)	9.5	9.5
49824/H (< T)	8	8
49824/P (< T)	8	8
49825/H (= T)	8	8
49825/P (= T)	8	8
49860/H (< T)	8	8
49860/P (< T)	8	8
49861/H (= T)	8	8
49861/P (= T)	8	8

Následně bylo provedeno vyhodnocení mechanických zkoušek ve všech třech diskutovaných stěnách a to totožným způsobem jako v předešlém případě, kdy byly vzorky odebrány po odválcování na poutní stolici.

### 5.1 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 10 mm

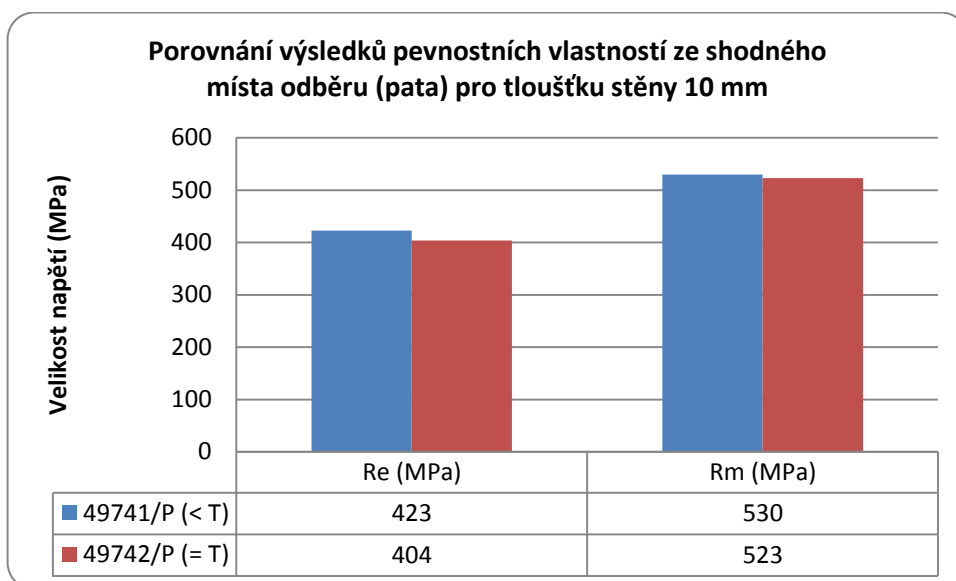
Zjištěné hodnoty meze kluzu (Re), pevnosti (Rm), tažnosti (A5) a kontrakce (Z), trubky č. 49471, která byly odválcována za snížených teplot a trubky č. 49472, odválcované za standardních teplot jsou uvedeny v **tabulce č. 14**. Výsledky nárazové práce jsou uvedeny v **tabulce č. 15**.

**Tab. 14.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 10 mm

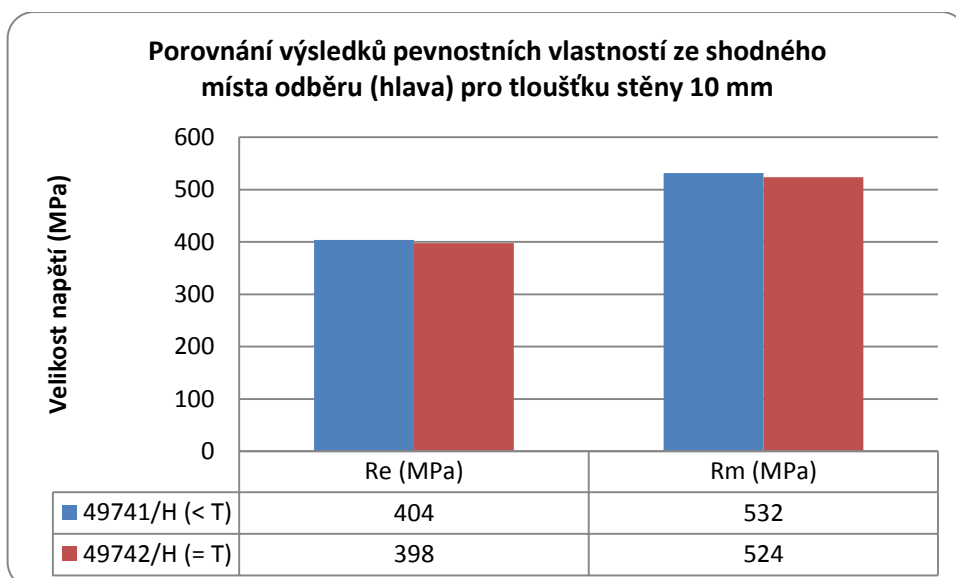
č. trubky	Re (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	Z (%)
49741/P(< T)	423	530	26,6	69,37
49741/H(< T)	404	532	29,8	70,33
č. trubky	Re (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	Z (%)
49742/P (= T)	404	523	34,6	71,24
49742/H (= T)	398	524	30,5	67,58

Z výsledků zkoušek tahem uvedených v **tabulce č. 14** vyplývá, že snížená teplota doválcování měla pozitivní vliv. U Re i Rm bylo totiž v porovnání s místem odběru trubky odválcované za standardních teplot po normalizaci dosaženo vyšších hodnot – nárůst však není nijak významný. Naopak hodnoty plastických vlastností (prodloužení a kontrakce) byly vyšší u vzorků trubky odválcované za standardních teplot, což koresponduje s nižšími hodnotami meze kluzu a pevnosti.

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 53 a č. 54**.



**Obr. 53.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



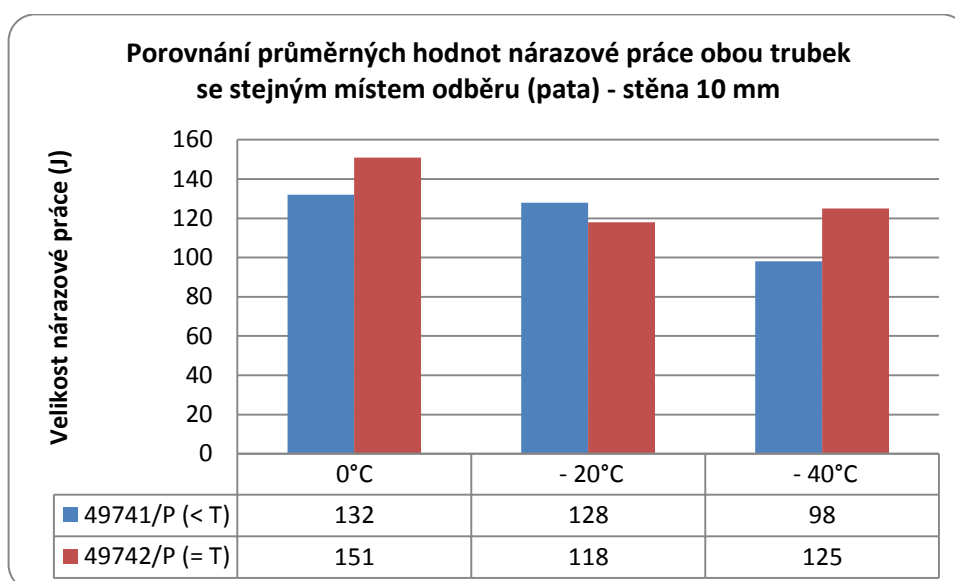
**Obr. 54.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

Oproti výsledkům nárazové práce u vzorků odebraných po odválcování, kdy tyto hodnoty byly obecně vyšší u trubky odválcované za snížených teplot, se stejné zjištění po ohřevu v krokové peci u stěny 10 mm nepotvrdilo. Výsledky nárazové práce jsou v tomto případě výrazně vyšší u trubky odválcované při běžných podmínkách. Minimální požadovaná hodnota 27 J je však plněna s velkou rezervou a to i u vzorků zkoušených při teplotě  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

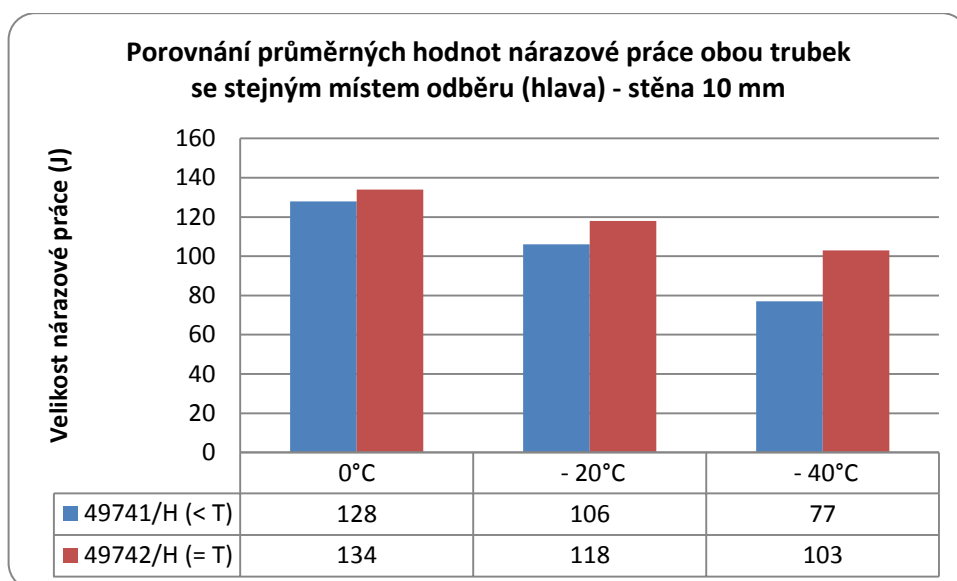
**Tab. 15.** Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 10 mm

č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49741/P (< T)	T	0	131	141	123	132
49741/P (< T)	T	-20	106	139	139	128
49741/P (< T)	T	-40	97	92	106	98
49741/H (< T)	T	0	139	117	129	128
49741/H (< T)	T	-20	106	111	102	106
49741/H (< T)	T	-40	71	81	78	77
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49742/P(= T)	T	0	145	157	161	151
49742/P(= T)	T	-20	101	109	144	118
49742/P(= T)	T	-40	102	138	134	125
49742/H(= T)	T	0	143	139	120	134
49742/H(= T)	T	-20	107	126	122	118
49742/H(= T)	T	-40	118	115	76	103

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 55 a č. 56**.

**Obr. 55.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

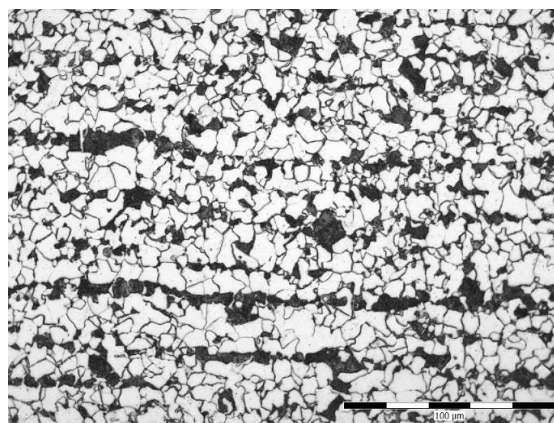
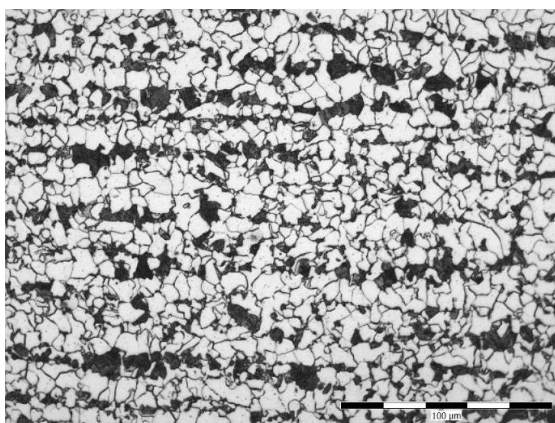




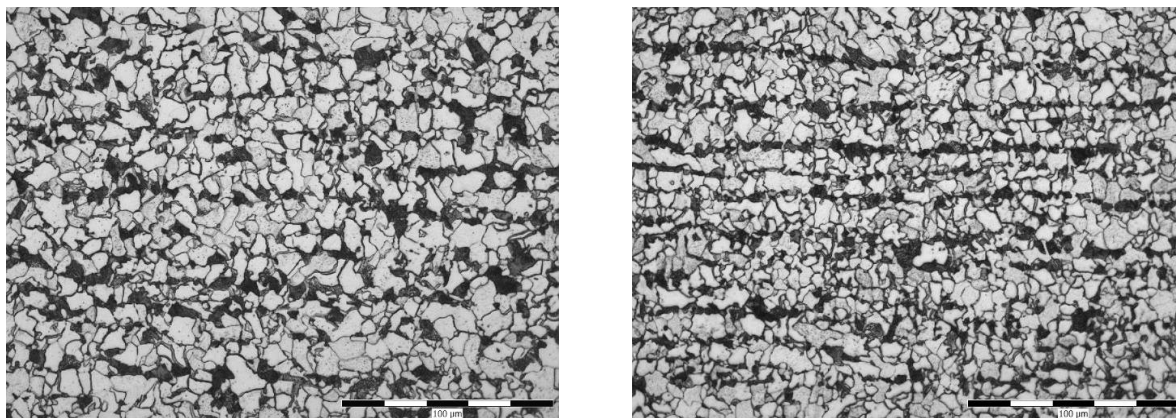
**Obr. 56.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

## 5.2 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 10 mm

Detaily mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 57 a č. 58**, z trubky válcované za standardních teplot je poté uvedena na **obrázku č. 59 a č. 60**. U všech vzorků bylo hodnocení velikosti zrna totožné.



**Obr. 57 a Obr. 58.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49741/H a 49741/P)



**Obr. 59 a Obr. 60.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49742/H a 49742/P)

### 5.3 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 30 mm

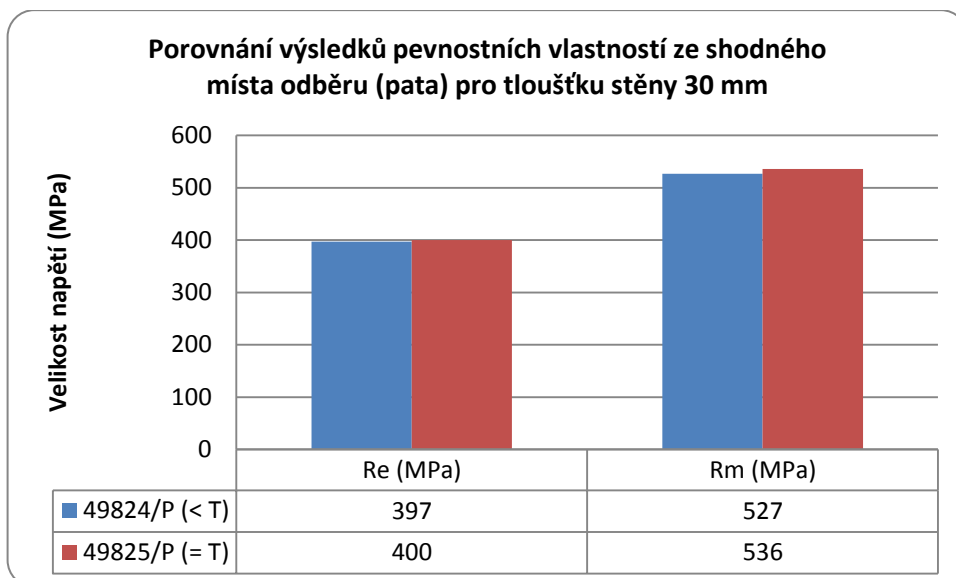
Zjištěné hodnoty meze kluzu ( $R_e$ ), pevnosti ( $R_m$ ), tažnosti ( $A_5$ ) a kontrakce ( $Z$ ) u trubek stěny 30 mm jsou uvedeny v **tabulce č. 16**. Trubka č. 49824 – snížená doválcovací teplota a trubka č. 49825 – standardní podmínky. Výsledky nárazové práce jsou uvedeny v **tabulce č. 17**.

**Tab. 16.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 30 mm

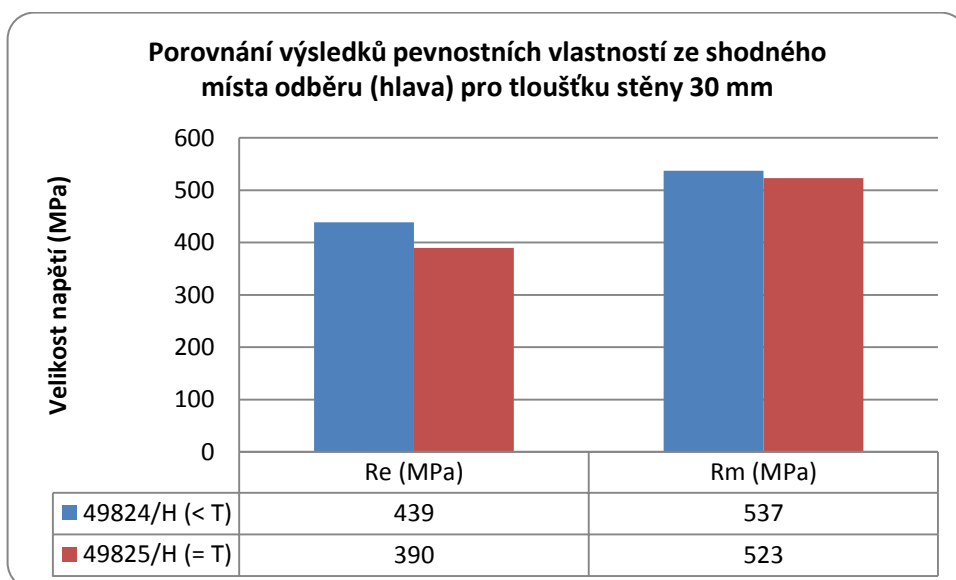
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49824/P(< T)	397	527	34,4	74,9
49824/H(< T)	439	537	29,6	75,09
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49825/P (= T)	400	536	31,6	72,85
49825/H (= T)	390	523	32,6	73,99

Výsledky tahové zkoušky u stěny 30 mm jsou u vzorků odebraných z patní části prakticky vyrovnané – rozdíly jsou pouze v jednotkách MPa. Výrazným rozdílem jsou však výsledky meze kluzu u vzorků odebraných z hlavové části, u nichž jak je zřejmé z **tabulky č. 16**, je u trubky válcované za snížených teplot dosaženo o bezmála 50 MPa vyšší hodnoty. Hodnoty pevnosti  $R_m$  jsou u obou trubek přitom v rozmezí pouhých 15 MPa.

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 61 a č. 62**.



**Obr. 61.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



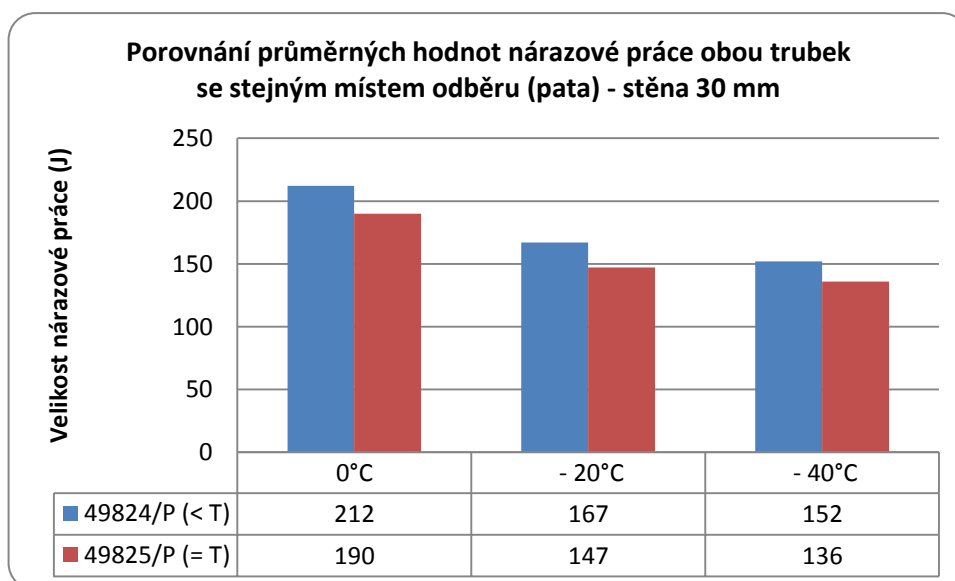
**Obr. 62.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

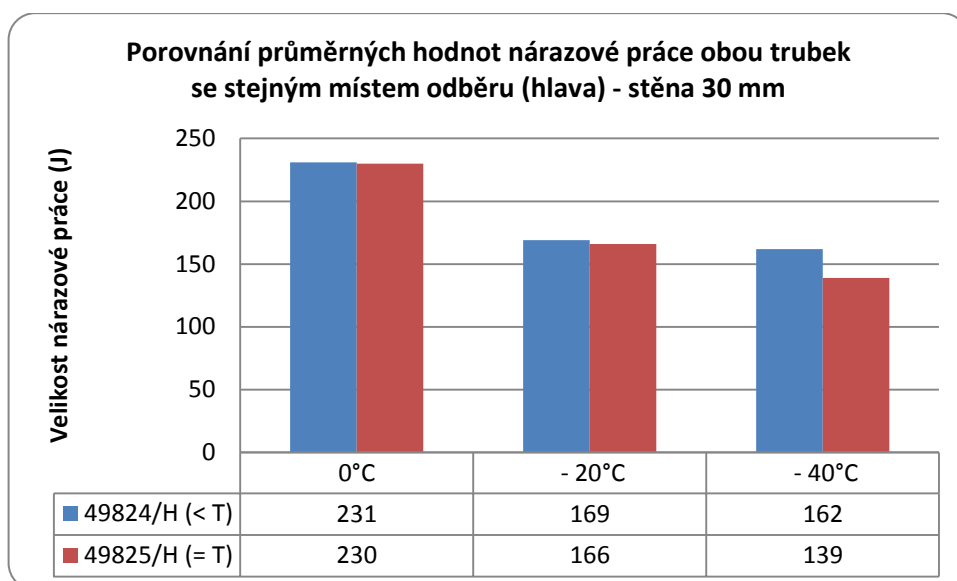
Průměrné hodnoty nárazové práce dosažené u trubky stěny 30 mm jsou jak v patním, tak v hlavovém konci vyšší u trubky odválcované za snížených teplot. Ve všech případech byla překročena hodnota nárazové práce 100 J a dílčí vzorky v jednotlivých sadách měly navíc velmi malý rozptyl dosažených hodnot.

**Tab. 17.** Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 30 mm

č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49824/P (< T)	T	0	169	234	234	212
49824/P (< T)	T	-20	159	173	170	167
49824/P (< T)	T	-40	148	167	142	152
49824/H (< T)	T	0	232	231	230	231
49824/H (< T)	T	-20	172	162	172	169
49824/H (< T)	T	-40	143	152	190	162
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49825/P(= T)	T	0	199	185	186	190
49825/P(= T)	T	-20	154	145	141	147
49825/P(= T)	T	-40	132	120	156	136
49825/H(= T)	T	0	231	230	229	230
49825/H(= T)	T	-20	171	170	157	166
49825/H(= T)	T	-40	134	139	145	139

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 63 a č. 64**.

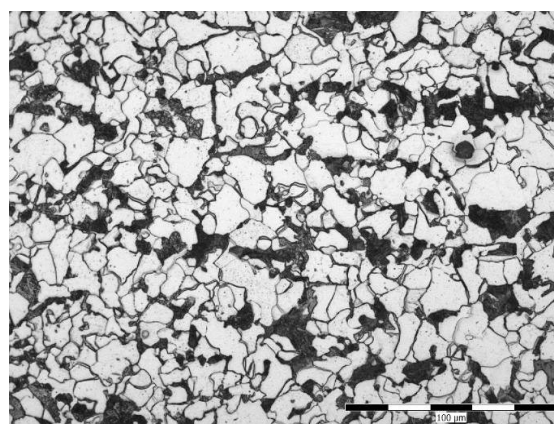
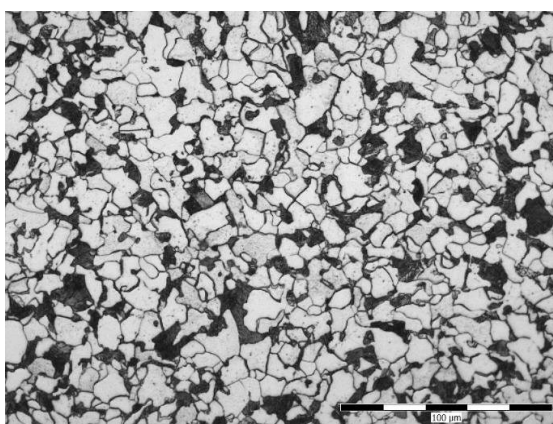
**Obr. 63.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru



**Obr. 64.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

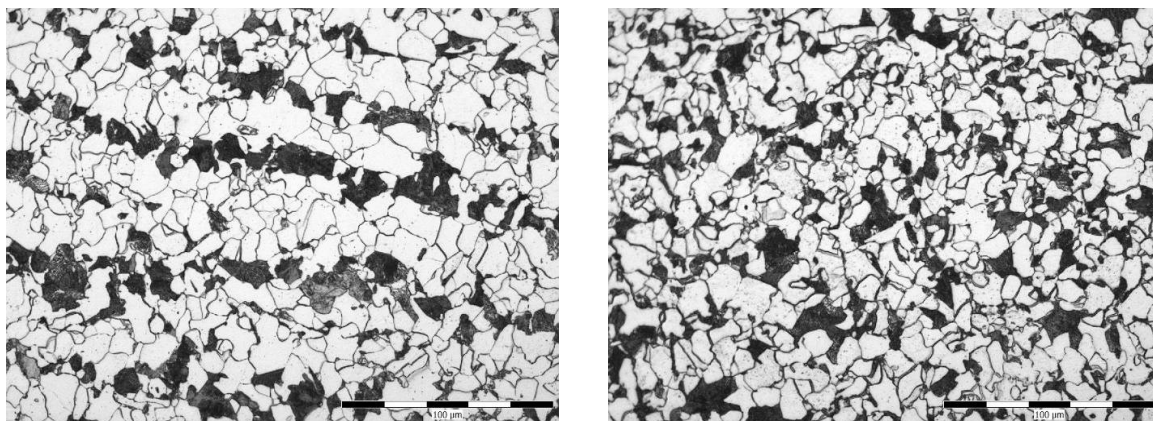
#### 5.4 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 30 mm

Detailní snímky mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 65 a č. 66**, z trubky válcované za standardních teplot je zobrazena na **obrázku č. 67 a č. 68**. U všech vzorků bylo hodnocení velikosti zrna totožné.



**Obr. 65 a Obr. 66.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49824/H a 49824/P)





**Obr. 67 a Obr. 68.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49825/H a 49825/P)

### 5.5 Výsledky mechanických zkoušek trubek tloušťky 60 mm

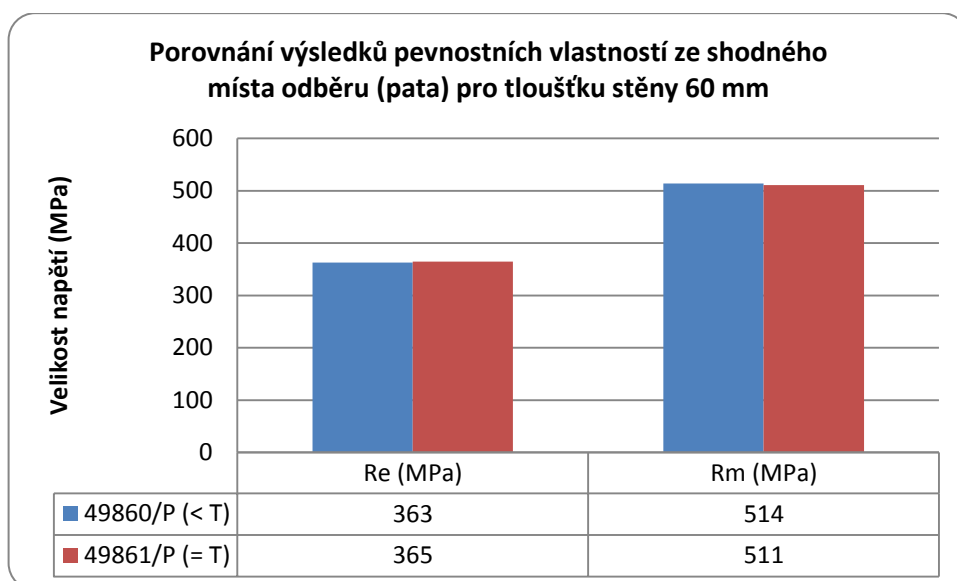
Také u stěny 60 mm byly odebrány stejné sady vzorků jako v předchozích případech a zjištěné hodnoty meze kluzu ( $R_e$ ), pevnosti ( $R_m$ ), tažnosti ( $A_5$ ) a kontrakce ( $Z$ ), trubky č. 49860 – snížená doválcovací teplota a trubky č. 49861 – standardní válcování jsou uvedeny v **tabulce č. 18**. Výsledky nárazové práce jsou uvedeny v **tabulce č. 19**.

**Tab. 18.** Výsledky mechanických vlastností trubek tloušťky stěny 60 mm

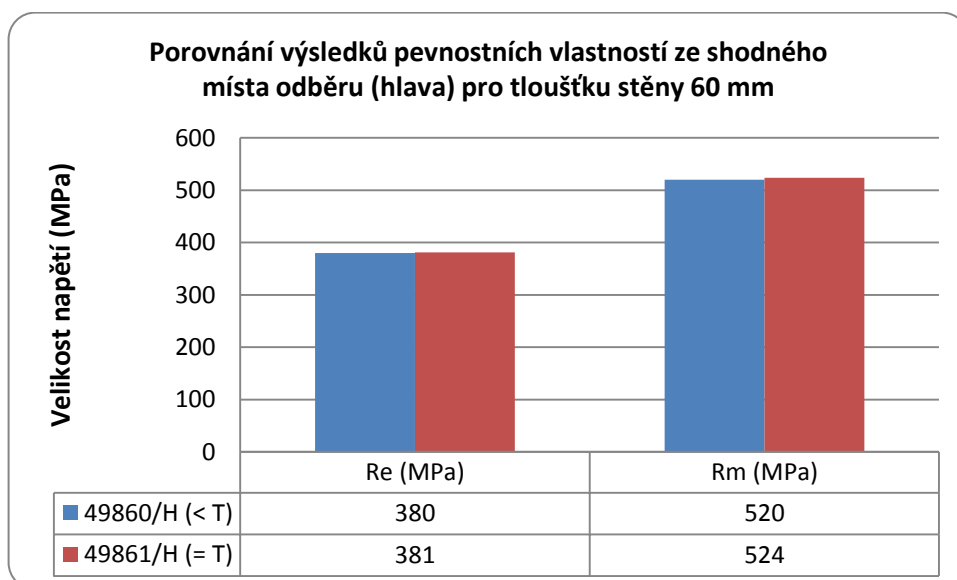
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49860/P (< T)	363	514	33,8	73,99
49860/H (< T)	380	520	35	73,88
č. trubky	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)
49861/P (= T)	365	511	35,4	72,96
49861/H (= T)	381	524	29,8	73,72

Výsledky uvedené v **tabulce č. 18** ukazují téměř shodné výsledky meze kluzu a pevnosti v obou sledovaných případech. Rozptyl hodnot je po ohřevu v krokové peci v několika málo jednotkách MPa. Obdobně vyrovnaných hodnot bylo dosaženo také u kontrakce a tažnosti. Jediným výrazněji odchylným výsledkem byla tažnost u trubky 49861/H odválcované za standardních teplot ( $A_5 = 29,6$  %).

Porovnání výsledků pevnostních vlastností - meze kluzu a pevnosti, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 69 a č. 70**.



**Obr. 69.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru



**Obr. 70.** Grafické srovnání pevnostních vlastností zkoušky tahem, ze stejného místa odběru

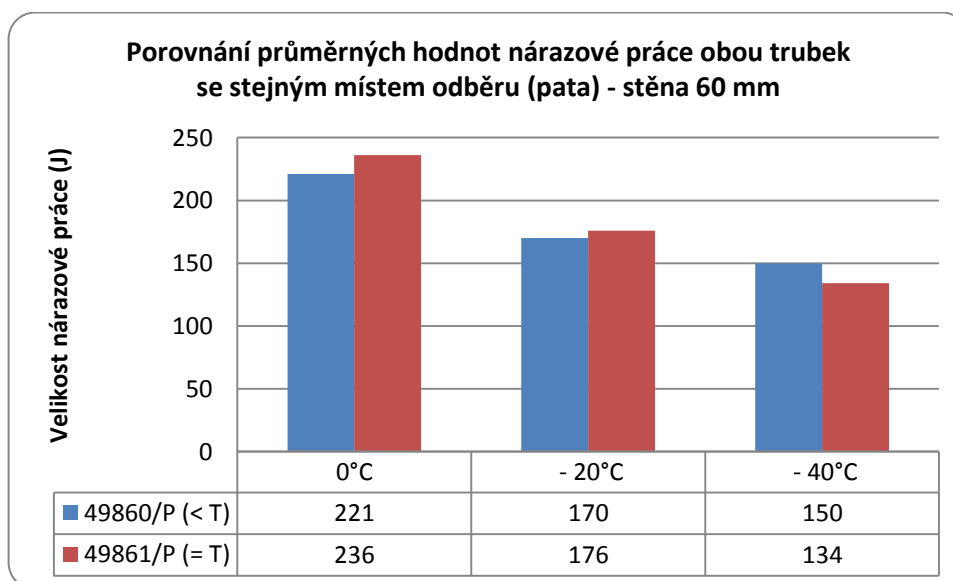
Stejně jako u výsledků tahových zkoušek bylo obdobně vyrovnaných hodnot dosaženo i u zkoušek nárazové práce. Průměrné dosažené hodnoty jsou u obou trubek v daných teplotních podmínkách téměř totožné. Za zmínku stojí také fakt, že všechny výsledky nárazové práce dosáhly velmi vysokých hodnot i u tak extrémních podmínek jako je zkušební teplota  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což u stěny 60 mm ukazuje velice vysoký stupeň normalizace.

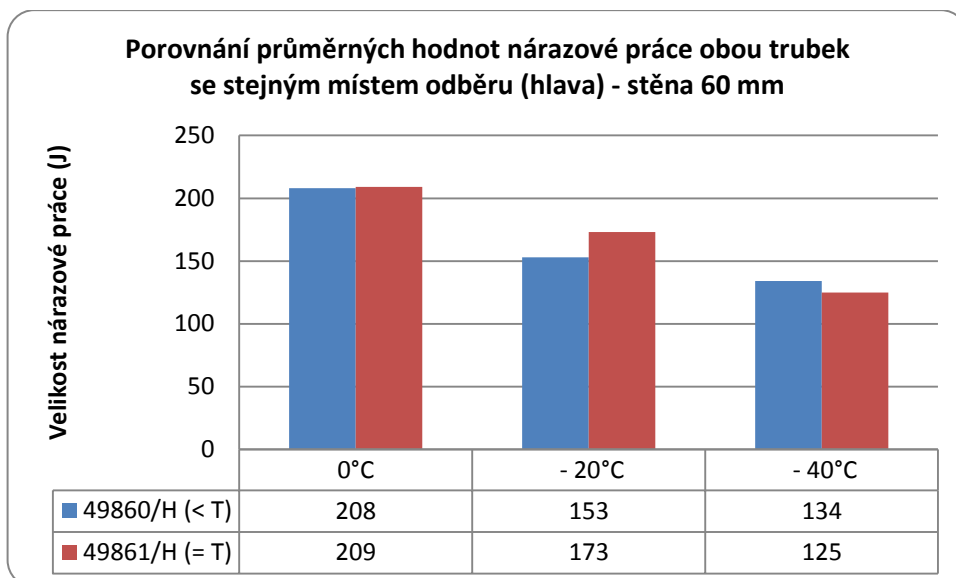


**Tab. 19.** Výsledky nárazové práce trubek tloušťky stěny 60 mm

č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49860/P (< T)	T	0	215	215	232	221
49860/P (< T)	T	-20	157	185	167	170
49860/P (< T)	T	-40	131	167	153	150
49860/H (< T)	T	0	210	197	216	208
49860/H (< T)	T	-20	152	164	144	153
49860/H (< T)	T	-40	138	136	129	134
č. trubky	směr vláken	Zkušební teplota (°C)	Nárazová práce (J)			Průměrná hodnota (J)
49861/P(= T)	T	0	231	239	238	236
49861/P(= T)	T	-20	165	183	179	176
49861/P(= T)	T	-40	115	137	150	134
49861/H(= T)	T	0	202	173	252	209
49861/H(= T)	T	-20	181	164	174	173
49861/H(= T)	T	-40	118	160	97	125

Porovnání průměrných výsledků nárazové práce, v místě odběru (pata a hlava) je znázorněno na **obrázcích č. 71 a č. 72**.

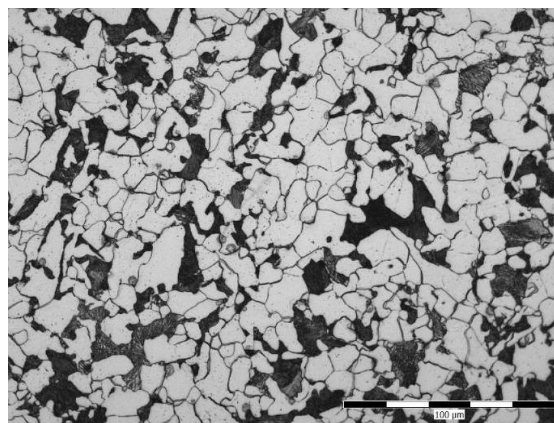
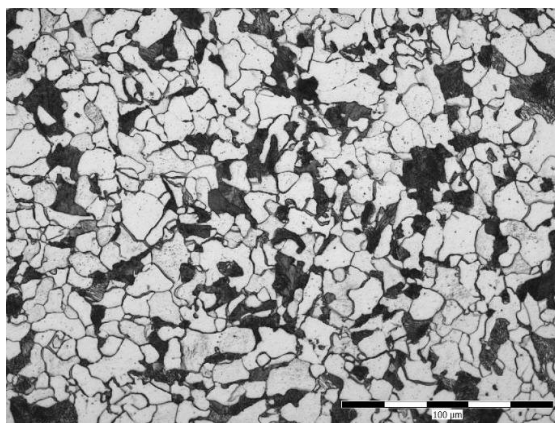
**Obr. 71.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru



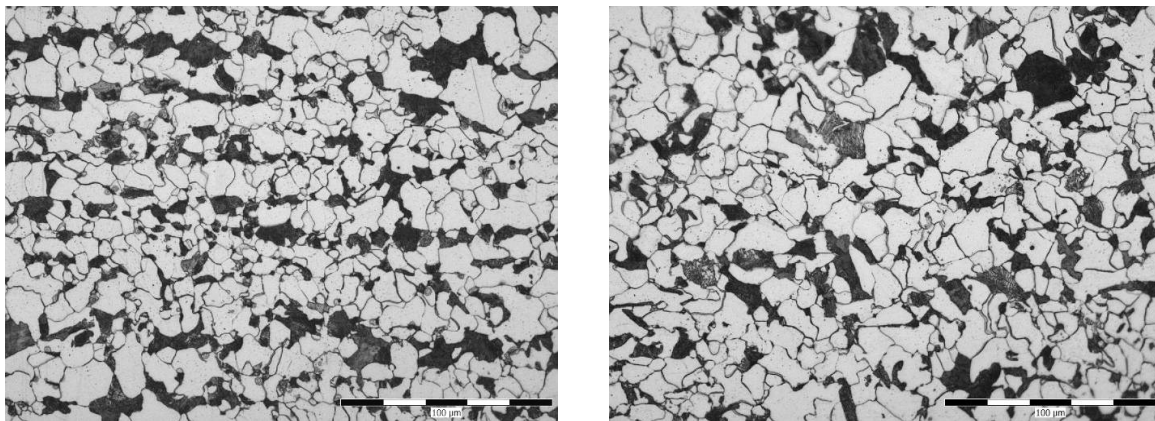
**Obr. 72.** Grafické srovnání průměrných hodnot nárazové práce, ze stejného místa odběru

## 5.6 Výsledky metalografických zkoušek trubek stěny 60 mm

Snímky mikrostruktury vzorků odebraných po tahové zkoušce, které byly zvětšeny opět 500 x, jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Mikrostruktura patního a hlavového konce z trubky válcované za snížených teplot je zobrazena na **obrázku č. 73 a č. 74**, z trubky válcované za standardních teplot je zobrazena na **obrázku č. 75 a č. 76**. Také v tomto případě bylo hodnocení velikosti zrna u všech vzorků totožné.



**Obr. 73 a Obr. 74.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za snížených teplot (49860/H a 49860/P)



**Obr. 75 a Obr. 76.** Mikrostruktura vzorků odválcované trubky za standardních teplot (49861/H a 49861/P)

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo ověřit vliv teplotně deformačních podmínek na výsledné mechanické a strukturní vlastnosti, při výrobě bezešvých ocelových trubek jakosti S355J2H na středisku Velký Mannesmann provozu Válcovny trub, Třineckých železáren a.s.

Vybrány byly trubky tloušťky stěn 10, 30 a 60 mm ve válcovaném průměru 288 mm, který byl následně kalibrován do průměru 273 mm. Všechny trubky byly odválcovány ze shodné tavby pod označením T18848 a vsázkového materiálu průměru 410 mm. Trubky byly označeny standardní číselnou řadou, která se na provozu Válcovna trub používá. V této práci byly trubky odválcované za snížených teplot označeny  $< T$ , a trubky odválcované za standardních teplot označeny  $= T$ .

V první části experimentu této práce byly hodnoceny výsledky tahových, rázových a strukturních vlastností trubek po válcování na poutní stoli, před ohřevem v Krokové peci. Ve všech případech byly zaznamenány vyšší hodnoty jak meze kluzu, tak pevnosti u trubek odválcovaných za nižších doválcovacích teplot. Nejmarkantnější rozdíl byl zjištěn u trubek stěny 10 mm, kdy tahová zkouška odebraná z patního konce byla v mezi kluzu o 71 MPa, a pevnost o 45 MPa vyšší než u trubky se standardní doválcovací teplotou. U trubek této stěny byl shledán také rozdíl ve výsledcích nárazové práce, kde trubka válcovaná za standardních teplot nesplnila při zkoušené teplotě - 40°C průměrnou minimální hodnotu 27 J z hlavového konce. Co se týče výsledků tahové zkoušky trubek s tloušťkou stěny 30 mm tak zde byly výsledky takřka totožné. Rozdíl nastal opět u zkoušky rázem odebrané z hlavového konce, kdy opět trubka válcovaná za standardních teplot nesplnila při teplotě - 40°C minimální hodnotu 27 J. Trubky stěny 60 mm vykázaly totožné výsledky jak u zkoušky tahem, tak také rázem. Všechny tyto výsledky byly taktéž potvrzeny při metalografickém rozboru a hodnocení velikosti zrna.

Druhá část experimentální práce se zabývala hodnocením totožných trubek z hlediska mechanických a strukturních vlastností po ohřevu v Krokové peci, kalibraci a ochlazení sprchami na chladníku. Po ohřevu v Krokové peci došlo u všech trubek k vyrovnání výsledků meze kluzu, pevnosti a také nárazové práce. Minimální hodnoty tahové zkoušky byly splněny s dostatečnou rezervou a také při zkušební teplotě - 40 °C nepodkročily výsledky hodnotu 70 J. V některých případech přesáhly výsledky hodnotu 200 J. Zároveň došlo ke zjemnění zrna, což koresponduje s dosaženými hodnotami mechanických zkoušek.

Uvedená práce prokázala významný vliv doválcovací teploty na výsledné mechanické vlastnosti trubek. Pokud by nastal případ, kdy by poslední tvářecí operací nebyla kalibrace na finální průměr, nýbrž rozválcování předvalku na poutní stoli, lze dosáhnout sníženou teplotou doválcování požadovaných mechanických vlastností. Zavedení snížené doválcovací teploty na poutní stoli, by za určitých okolností mohla vést k snížení nákladů na výrobu a zpracování trubek na provozu Válcovna trub.

## Seznam použité literatury

- [1] MAMUZIČ I., DRUJAN V.M. *Teorija, materijali, tehnologija čeličnih cijevi*. Hrvatsko metalurško društvo. Zagreb 1996. 510 stranica.
  - [2] POČTA B. *Ocelové trubky: jejich výroba a použití*. Praha SNTL 1954. 282 s.
  - [3] POČTA B. *Ocelové trubky I. díl Bezešvé trubky*. Praha SNTL 1963. 416 s.
  - [4] KOMORI K. *Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimension rigid – plastic finite - element Method, International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 47, Issue 12, December 2005, Pages 1838 - 1853.
  - [5] KOMORI K., SUZUKI M.: *Simulation of deformation and temperature in press roll piercing, Journal of Materials Processing Technology*, Volume 169, Issue 2, 10 December 2005, Pages 249 - 257.
  - [6] VUKOTA B. *Metal shaping processes, I., Rolling of Metals* 2009. 141 s.
  - [7] TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. *Historie společnosti*.  
<http://www.trubky.cz/index.php?la=c&id=12>
  - [8] KLÍBER J., KOCICH R., *Výzkum, vývoj a ověření nových technologií výroby trub*. VŠB-TU Ostrava. 2008.
  - [9] FANINI, S., GHIOTTI, A., BRUSHI, S. Prediction of the fracture due to Mannesmann effect in tube piercing. [i]AIP Conference Proceedings[i] 908, 1407 (2007).
  - [10] JURČA R. *VTvvv - ZTP VT- Pro výrobu ocelových trubek na válcovací trati Velký Mannesmann*. Ostrava: TŽ, a.s. 2014. 48 s.
  - [11] MIGDAL M., *Technická příručka zařízení*, TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., duben 2014
  - [12] SQUERZI M. *VTvvv - ZTP VT- Pro tepelné zpracování trubek*. Ostrava: TŽ, a.s. 2014. 20 s.
  - [13] ŽÍDEK M., *Metallurgická tvaritelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha 1995.
  - [14] GINZBURGH, V. *Metallurgical design of flat rolled steels*. New York: M. Dekker, 2005. 726 s. ISBN 80-85341-45-x.
  - [15] MAZANCOVÁ, E., MAZANEC, K. *Moderní metody tepelného zpracování (vybrané kapitoly)*. 1. Vydání. Ostrava: VŠB Ostrava, 1987. 127 s.
- 
- Squerzi, M. *Vliv teplotně deformačních podmínek na strukturu a mechanické vlastnosti bezešvých trubek*. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2015.

- [16] KLÍBER J., *Základy tváření kovů*. Skriptum VŠB-TU. Ostrava 1985. 267 s.
- [17] ŽÍDEK M., *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla*. Skriptum VŠB-TU. Ostrava 1982. 161 s.
- [18] SEDLÁČEK, Zotavení a rekrystalizace. 1 vydání. Praha: Academica, 1985. 280 s.
- [19] KOCICH R., *Termomechanické procesy tváření – studijní opory*. VŠB-TU Ostrava. 2013. 117 s.
- [20] SOJKA J. *Technické materiály – studijní opory*. VŠB-TU Ostrava. 2014. 173 s.
- [21] Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products ASTM A370. United States of America. 2012.